

**Abschlussbericht** zur BMVI-Förderlinie „mFUND - Modernitätsfonds“

# Erweiterung von Fahrerassistenzsystemen im Bahnbereich durch die Verbesserung der Datengrundlage – FAS-D

Förderlinie: F1

Gesamtlaufzeit: 12 Monate

Aktenzeichen: 6196.24/1-8 – VB18F1031A

## Konsortialpartner:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR); Institut für Verkehrssystemtechnik

Institut für angewandte Verkehrstelematik GmbH (INAVET)

Ostdeutsche Eisenbahn GmbH (ODEG)

## Konsortialführung:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.

Institut für Verkehrssystemtechnik (Konsortialführer)

Lilienthalplatz 7

38108 Braunschweig

## Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Christian Meirich

Tel.: 0531 295 3824

E-Mail: christian.meirich@dlr.de

Braunschweig, den **31.08.2020**

Dieser Abschlussbericht wird vorgelegt von:

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Verkehrssystemtechnik:**

Dr.-Ing. Christian Meirich; Leander Flamm; Dr.-Ing. Bärbel Jäger

**Institut für angewandte Verkehrstelematik GmbH**

Patrick Reiher; Prof. Dr. Jürgen Krimmling

**Ostdeutsche Eisenbahn GmbH**

Gregor Ullrich

## **Förderhinweis**

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Programm mFund gefördert. Die vorliegenden Ergebnisse sind im Rahmen des Projektes „FAS-D: Erweiterung von Fahrerassistenzsystemen im Bahnbereich durch die Verbesserung der Datengrundlage (45MF00031A) entstanden.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	7
2. Funktionsweise und betriebliche Anwendungsfälle für FAS.....	8
2.1. Funktionsweise .....	8
2.2. Betriebliche Anwendungsfälle und Optimierungspotentiale .....	11
3. Datenverfügbarkeit für Fahrerassistenzsysteme .....	16
3.1. Analyse von Input-Faktoren und Schnittstellen .....	16
3.1.1. Allgemeines Vorgehen zur Beschreibung der Datengrundlage.....	16
3.1.2. Kenngrößen für bestehende Fahrerassistenzsysteme.....	18
3.1.3. Verfügbare Inputgrößen für eine Erweiterung von Fahrerassistenzsystemen.....	26
3.2. Verbesserung bestehender und zusätzlicher Funktionen von FAS .....	30
3.2.1. Erhöhung der Energieeinsparung .....	31
3.2.2. Abbau und Vermeidung von Verspätungen.....	34
3.2.3. Erhöhung der Leistungsfähigkeit.....	36
3.2.4. Vermeidung von elektrischen Lastspitzen.....	38
3.2.5. Verschleißarmes Fahren .....	40
3.2.6. Sicherstellung und Steigerung der Akzeptanz des Systems bei den Triebfahrzeugführern .....	42
3.2.7. Funktionen zu Fahrgastinformation .....	44
3.3. Erweiterung der Datengrundlage sowie Anforderungsdefinition .....	45
3.4. Aufwand nach Optimierungsziel .....	48
4. Datenmanagementsystem und Schnittstellen .....	50
5. Validierung und Simulation .....	53
5.1. Folgefahrt / Nachfahren.....	54
5.2. Zugkreuzung.....	56
5.3. Zugüberholung .....	57
6. Zusammenfassung und Ausblick.....	59
Anhang.....	63

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Betrachtungsstufen für die Optimierung durch FAS [10] .....	8
Abbildung 2: Funktionsweise smarttrains.das der INAVET GmbH .....	9
Abbildung 3: Exemplarische Anzeige smarttrains.das der INAVET GmbH (links) und Abfahrtsanzeige (rechts) .....	10
Abbildung 4: Fahrerassistenzsystem bei CANTUS als Smartphone-Anwendung .....	11
Abbildung 5: Schematische Darstellung der energieoptimierten Fahrweise im Fall der Blockabschnittsräumung (DLR) .....	12
Abbildung 6: Schematische Darstellung einer energieoptimierten Zugkreuzung (DLR) .....	14
Abbildung 7: Schematische Darstellung vom Datenursprung zur Fahrempfehlung .....	16
Abbildung 8: Schematische Darstellung einer innerhalb eines Korridors optimierten Fahrweise .....	24
Abbildung 9: Vernetzung von FAS, Variante 1 .....	51
Abbildung 10: Vernetzung von FAS, Variante 2 .....	51
Abbildung 11: Betrachteter Streckenabschnitt der ODEG (lila) und Untersuchungsbereich der Berechnung (grün) .....	54
Abbildung 12: Grafische Auswertung der Energieverbräuche und Zugfolgezeiten für die Folgefahrt .....	55
Abbildung 13: Vergleich der Geschwindigkeitsdiagramme ohne FAS (links) und mit vFAS (rechts) .....	55
Abbildung 14: Vergleich der Zeit-Weg-Linien für die Folgefahrt mit unvernetztem FAS (links) und vFAS minEne (rechts) .....	56
Abbildung 15: Vergleich der Zeit-Weg-Linien für eine Zugkreuzung mit unvernetztem FAS (links) und vFAS (rechts) .....	57
Abbildung 16: Vergleich der Zeit-Weg-Linien für eine Zugüberholung ohne (links) und mit vFAS (rechts) .....	58
Abbildung 17: Vergleich der Geschwindigkeitsdiagramme ohne (links) und mit vFAS (rechts) ...	58
Abbildung 18: Vergleich der Energieverbräuche ohne (links) und mit vFAS (rechts) .....	58

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Betriebliche Situationen mit angestrebten Optimierungszielen .....	15
Tabelle 2:	Grundschemata der Datenaufbereitung .....	17
Tabelle 3:	Informationen zur unmittelbaren Anzeige auf einem FAS mit Datenursprung ....	18
Tabelle 4:	Zusatzinformationen zur Anzeige auf einem FAS .....	20
Tabelle 5:	Eingangsgrößen des Bremssystems .....	21
Tabelle 6:	Eingangsgrößen für die fahrdynamische Berechnung .....	22
Tabelle 7:	Eingangsgrößen aus der Infrastruktur .....	23
Tabelle 8:	Eingangsgrößen des Zuges .....	23
Tabelle 9:	Eingangsgrößen aus dem Fahrplan .....	24
Tabelle 10:	Eingangsgrößen aus dem Verbrauch des Zuges .....	25
Tabelle 11:	Sonstige Eingangsgrößen .....	26
Tabelle 12:	Ungenutzte oder in der Entwicklung befindliche Informationen zur unmittelbaren Anzeige .....	26
Tabelle 13:	Ungenutzte oder in der Entwicklung befindliche Zusatzinformationen zur Anzeige auf einem FAS .....	28
Tabelle 14:	Zusätzliche, noch nicht genutzte oder in der Planung befindliche Inputfaktoren .....	29
Tabelle 15:	Optimierungsziele und Funktionen von vFAS .....	30
Tabelle 16:	Für die Optimierungsziele der Energieeinsparung notwendige Inputwerte .....	33
Tabelle 17:	Für die Optimierungsziele des Verspätungsabbaus notwendige Inputwerte .....	36
Tabelle 18:	Für die Optimierungsziele der Streckenleistungsfähigkeit notwendige Inputwerte .....	38
Tabelle 19:	Für die Optimierungsziele der Vermeidung von Lastspitzen notwendige Inputwerte .....	40
Tabelle 20:	Für die Optimierungsziele der Verschleißreduktion notwendige Inputwerte .....	42
Tabelle 21:	Für die Optimierungsziele der Tf-Akzeptanz notwendige Inputwerte .....	43
Tabelle 22:	Für die Optimierungsziele der Fahrgastinformation notwendige Inputwerte .....	44
Tabelle 23:	Nutzen der Inputwerte nach Optimierungsziel .....	47
Tabelle 24:	Anzahl notwendiger Inputwerte je Optimierungsziel .....	49
Tabelle 25:	Kommunikation zwischen FAS und FAS-Datenhaltung .....	52
Tabelle 26:	Qualitative Beschreibung der im Einsatz von vFAS erwarteten Potenziale .....	53
Tabelle 27:	Energieverbräuche und Zugfolgezeiten in den Szenarien maxKap und minEne ..	55

## Abkürzungsverzeichnis

ATO	Automatic Train Operation – Automatisierter Zugbetrieb
DB AG	Deutsche Bahn AG
DFZR	Dynamische Fahrzeitenregelung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
ETCS	European Train Control System
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FAS	Fahrerassistenzsystem
FAS-C	FAS mit zentraler Optimierung
FAS-O	FAS mit on board-Optimierung auf dem Zug
Fdl	Fahrdienstleiter
GPS	Global Positioning System
INAVET	Institut für angewandte Verkehrstelematik GmbH
LZB	Linienzugbeeinflussung
ODEG	Ostdeutsche Eisenbahn GmbH
RBL	Rechnergestütztes Betriebsleitsystem
Tf	Triebfahrzeugführer
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
vFAS	vernetztes FAS

## 1. Einleitung

Fahrerassistenzsysteme (FAS) stellen eine kostengünstige Möglichkeit dar, die Fahrweise eines Triebfahrzeugführers durch Empfehlungen auf Grundlage von betrieblichen oder verbrauchsorientierten Überlegungen zu optimieren. Insbesondere unter außerplanmäßigen Betriebsbedingungen können hier Verbesserungen erzielt werden, ohne in den technischen Kern der Fahrzeugsteuerung oder der Sicherungstechnik einzugreifen. Bisherige Systeme funktionieren auf Basis von Fahrplan- und Streckendaten sowie den aktuellen Parametern des überwachten Zugs, wodurch Fahrzeitreserven erkannt und z. B. zur Energieeinsparung genutzt werden können. Dies erlaubt einen Einsatz durch einzelne Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), die direkt von den Energieeinsparungen profitieren, ohne dass eine Vernetzung mit der Leitstelle oder mit Zügen anderer EVU notwendig ist. Hierdurch bleibt allerdings das Potenzial ungenutzt, über das gesamte Betriebsgeschehen Optimierungen durchzuführen, da lediglich auf den im Zug bekannten Zustand des Betriebs reagiert werden kann.

Durch die stetig voranschreitende digitale Vernetzung und den damit verbundenen schnelleren und unmittelbaren Datenaustausch eröffnen sich auch im Bereich der FAS neue Möglichkeiten. Vernetzte Fahrerassistenzsysteme (vFAS) erhalten zusätzlich zu den oben genannten Informationen unter anderem noch Informationen über die Positionen und Zustände anderer Züge aus der Leitstelle. So können zusätzlich Empfehlungen auf der Basis der aktuellen betrieblichen Situation gegeben und entsprechende Optimierungsansätze über eine Vielzahl an Zügen verfolgt werden.

Das vorliegende Dokument soll als Vorstudie die Machbarkeit einer Erweiterung von FAS hin zu einer Vernetzung der Systeme auf Basis einer verbesserten Datengrundlage aufzeigen. Hierfür wird zunächst die Funktionsweise bestehender Systeme analysiert, der benötigte Dateninput zusammengefasst und mit dem Fachwissen von Entwicklern und Anwendern abgeglichen. Dabei sollen sowohl die Vorteile der bekannten Systeme berücksichtigt als auch Verbesserungen identifiziert werden. Für die Verbesserung der Funktionsweise bestehender Systeme sowie eine Erweiterung auf vFAS ist es notwendig, die vorliegende Datengrundlage zu überprüfen und zu erweitern.

Da der Aufwand einer Vernetzung auch den Nutzen sowohl für die EVU als auch die Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) erhöhen soll, werden betrieblich relevante Situationen für die Anwendung von vFAS im Eisenbahnnetz identifiziert. Anhand dieser Situationen werden simulationsbasiert die Auswirkung auf den Energieverbrauch sowie auf die Zugfolgezeiten, als relevanter Eingangsparameter für die Leistungsfähigkeitsberechnung, aufgezeigt.

## 2. Funktionsweise und betriebliche Anwendungsfälle für FAS

In diesem Kapitel wird zunächst die allgemeine Funktionsweise von Fahrerassistenzsystemen erläutert und deren Möglichkeiten einer Vernetzung aufgezeigt. Im Anschluss werden betriebliche Anwendungsfälle und deren Optimierungspotentiale für den Einsatz vernetzter Fahrerassistenzsysteme identifiziert und beschrieben.

### 2.1. Funktionsweise

Fahrerassistenzsysteme sind weltweit erfolgreich im realen Bahnbetrieb im Einsatz [1–6]. Primäres Ziel bestehender Systeme ist die Energieeinsparung einzelner Fahrzeuge bei Einhaltung des vorgegebenen, konfliktfreien Fahrplans. Dies erfolgt generell über eine Verknüpfung von Fahrplan-, Zeit- und Positionsdaten. Es erfolgen entweder qualitative Fahrempfehlungen („Ausrollen lassen“), oder punktuelle Zeit- oder Geschwindigkeitsvorgaben. Während vor einigen Jahren nur minimale Energieeinsparungen erreicht wurden [7], haben aktuelle Metastudien Einsparungen von im Schnitt 8 bis 9 % dokumentiert [8]. Je nach Anwendungsfall können aber auch Werte von bis zu 15 % erreicht werden [8]. Hierin spiegeln sich technische Fortschritte in der Algorithmik und in den Kommunikationsstrategien zum Triebfahrzeugführer wider.

In [8] wird ebenfalls empirisch ergründet, mit welchen Motiven FAS von Anwendern eingesetzt werden, wobei die Energieersparnis als Hauptgrund identifiziert wird. In der Forschung werden dagegen auch weitergehende Ansätze untersucht, die eine Optimierung einer Zugfahrt nach weiteren Kriterien wie der Streckenkapazität oder der Lärmbelastung von Anwohnern ermöglichen [9]. Ebenso werden bei der Optimierung in bestehenden FAS nicht die Einflüsse anderer Züge und der allgemeinen Betriebssituation berücksichtigt, wodurch in einigen Situationen falsche, nicht zielführende oder schlimmstenfalls potenziell sicherheitskritische Empfehlungen gegeben werden, die der Lokführer in seiner Sicherheitsfunktion bemerken und ignorieren muss.

Nachfolgende Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung für die verschiedenen Optimierungsstufen bei der Entwicklung von FAS nach [10].

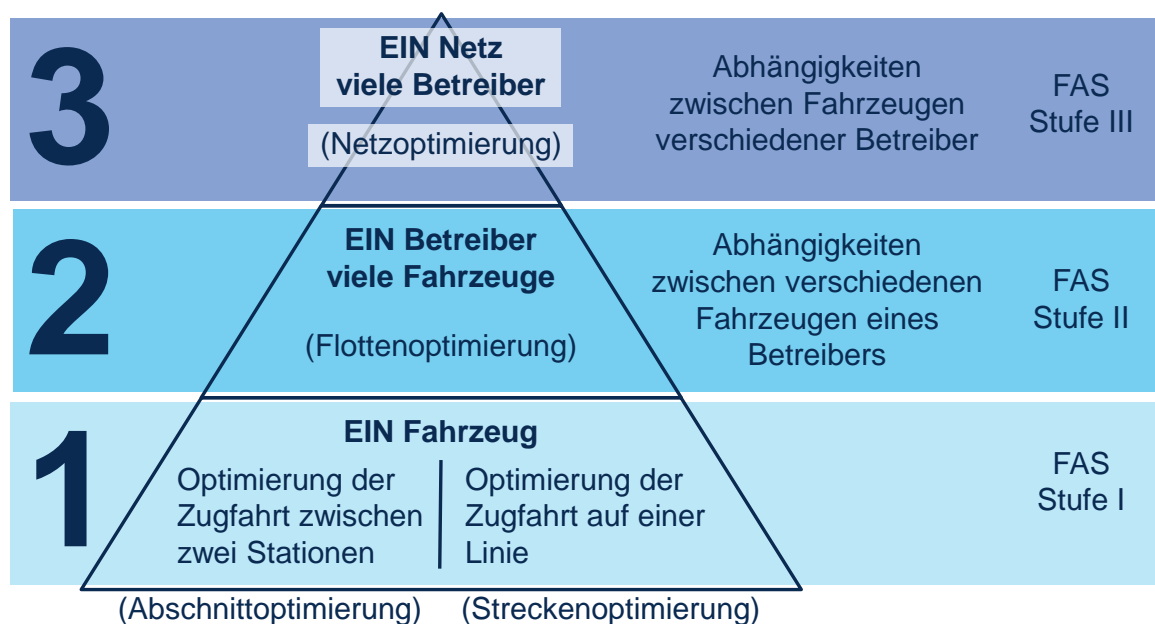
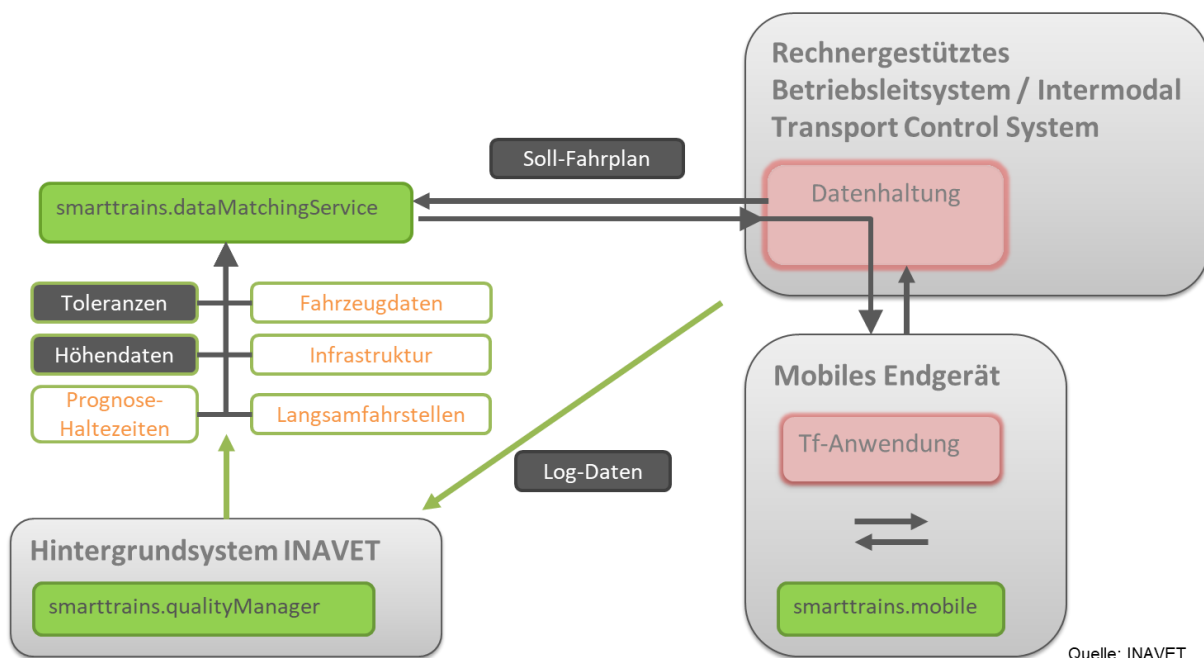


Abbildung 1: Betrachtungsstufen für die Optimierung durch FAS [10]



Der derzeitige Stand der Technik hinsichtlich der Datengrundlage bezieht sich auf die Optimierung der Fahrkurve eines einzelnen Fahrzeuges (vgl. Stufe 1) und ist vergleichsweise einfach umzusetzen. Sowohl technisch als auch betrieblich aufwendiger sind jedoch die Ansätze, bei denen die Datengrundlage so zu erweitern ist, dass auch eine Optimierung der Stufen 2 bzw. 3 ermöglicht wird. Dies betrifft sowohl die Ausrüstung anderer Züge oder einer zentralen Leitstelle als auch mögliche Prädiktionsverfahren auf Basis von Big Data-Analysen. Dabei sind neben der Anpassung der Datengrundlage zusätzlich auch Organisationsstrukturen zu schaffen, die ein vernetztes FAS vollumfänglich ermöglichen.

FAS verwenden fahrzeug- als auch infrastrukturspezifische Daten, welche unmittelbar mit Daten des Fahrplans abgeglichen werden, um eine entsprechende Fahrempfehlung ausgeben zu können. Zu den Fahrplandaten gehören sowohl geplante Ankunfts- und Abfahrtszeiten je Station oder Haltepunkt, als auch Prognosedaten für die Haltezeiten sowie tagesaktuelle Informationen wie relevante Langsamfahrstellen auf dem entsprechenden Infrastrukturabschnitt. Abbildung 2 beschreibt schematisch die Funktionsweise des FAS smarttrains.das der INAVET GmbH.



**Abbildung 2: Funktionsweise smarttrains.das der INAVET GmbH**

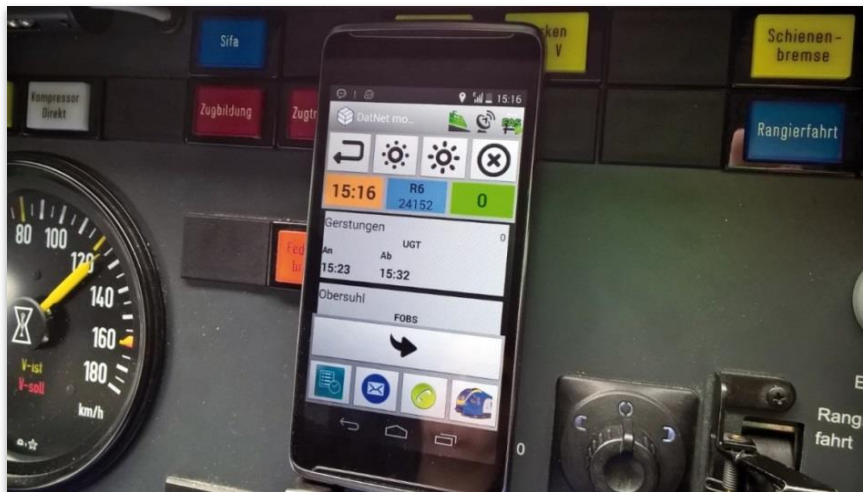
Wie in Abbildung 3 ersichtlich ist, werden auf dem Display eines FAS unter anderem Informationen zur aktuellen Geschwindigkeit, der nächste Haltepunkt mit der dazugehörigen Abfahrtszeit sowie die entsprechende Entfernung zu diesem angegeben. Auf Basis der aktuellen Zeit und der durch das System ermittelten optimalen Ankunftszeit am nächsten Haltepunkt wird überprüft, ob zeitliche Reserven vorliegen und ob demnach wie in diesem Beispiel eine „Auslauf“-Empfehlung zur energiesparenden Fahrweise gegeben werden kann. Des Weiteren können FAS auch Informationen zur planmäßigen Abfahrt darstellen (vgl. Abbildung 3, rechts).



Abbildung 3: Exemplarische Anzeige smarttrains.das der INAVET GmbH (links) und Abfahrtsanzeige (rechts)

Fahrerassistenzsysteme werden als zentrale Systeme oder als fahrzeugbezogene Systeme eingesetzt. Letztere besitzen den Vorteil, dass permanente Anpassungen der Fahrtrajektorie möglich sind, ohne dass eine Datenübertragung zu einer Zentrale erfolgen muss [11]. Zu den wesentlichen Funktionalitäten gehört neben der Optimierung der Fahrt zwischen zwei Halten auch die Bereitstellung von Abfahrtsempfehlungen (vgl. Abbildung 3, rechts). Die Optimierung erfolgt auf Basis wissenschaftlicher Grundlagen vorrangig durch Auslauf- und Tempomatempfehlungen. Die Basis der Abfahrtsempfehlungen ist der statische Fahrplan, welcher z. B. durch die Kopplung mit einem RBL-System dynamisiert werden kann, um tagesaktuelle Langsamfahrstellen zu berücksichtigen. Infrastrukturelle Besonderheiten wie Schutzstrecken, PZB-Beeinflussungen, zugnummernfeine Haltepositionen werden derzeit nur teilweise berücksichtigt. Elemente der dynamischen Fahrzeitenregelung wie beispielsweise unterschiedliche Strategien zum Aufholen von Verspätungen finden ebenfalls allmählich Anwendung in Fahrerassistenzsystemen [12]. Einen wesentlichen Einfluss auf die Wirksamkeit der FAS hat die Modellierung der Fahrdynamik der Fahrzeuge, der verschiedenen Bremsmodelle und der fahrdynamischen Widerstände. Ebenfalls ist eine energetische Optimierung bei verspäteten Zugkreuzungen auf eingleisigen Strecken möglich.

Ausgeführt werden FAS üblicherweise als Smartphone- oder als Tablett- Lösung (vgl. Abbildung 4). Ob die Empfehlungen optisch und / oder akustisch ausgegeben und ob die Geräte im direkten Sichtbereich des Triebfahrzeugführers angebracht werden, liegt in der Entscheidungskompetenz der jeweiligen EVU.



**Abbildung 4: Fahrerassistenzsystem bei CANTUS als Smartphone-Anwendung**

Ein nennenswerter Vorteil für die Ausrüstung und Weiterentwicklung von FAS ist die kurzfristige Umsetzbarkeit, welche ein großes Potenzial für die Übergangszeit bis zur flächendeckenden Einführung von ETCS und ersten Anwendungen des teilautomatisierten Fahrens (ATO over ETCS) bietet. Im Fall einer verzögerungsfreien Umsetzung des ETCS-Rollouts, wie zuletzt von der DB AG beschrieben, ist 2040 von einer Ausrüstung der letzten Betriebsregionen auszugehen [13]. Erst ab dann können flächendeckend Automatisierungslösungen implementiert werden, die auf ETCS aufbauen. Weiterhin ist für eine Automatisierung bei Bestandsfahrzeugen ein Eingriff in die Fahrzeugsteuerung und somit eine erneute Zulassung notwendig, was mit entsprechenden Kosten verbunden und je nach Fahrzeugalter nicht sinnvoll ist. Im Gegensatz dazu können FAS unabhängig von der Sicherungstechnik und ohne Veränderung der Fahrzeugsteuerung eingesetzt werden, wodurch resultierende positive Effekte zeitnah genutzt werden können.

## 2.2. Betriebliche Anwendungsfälle und Optimierungspotentiale

In diesem Abschnitt werden exemplarisch betriebliche Anwendungsfälle für den Einsatz von FAS sowie deren Vernetzung aufgezeigt und im Anschluss näher beschrieben.

Über eine neue Datenlage sowie durch den Einsatz von vFAS sollen die folgenden Optimierungsziele erreicht bzw. noch besser erreicht werden:

- Energieeinsparungen durch eine angepasste Fahrweise
- Pünktlichkeit der Zugfahrten
- zusätzlich positive Auswirkungen auf die Streckenkapazität
- Akzeptanz der Triebfahrzeugführer für die Nutzung

Der betriebliche Anwendungsfall für ein FAS ohne Vernetzung liegt in der Optimierung der eigenen Fahrtrajektorie. Das Hauptziel ist hierbei die energiesparende Fahrweise in Abhängigkeit der im Fahrplan vorhandenen Pufferzeiten (vgl. Abschnitt 2.1). Als weitere Möglichkeit ist hier aber auch der Verspätungsabbau zu nennen. In der Regel steht dieser jedoch im Gegensatz zu einer Energieeinsparung, da hier ein schnelleres Fahren fokussiert wird, um die verspätete Zeit wieder aufzuholen.

Darüber hinaus ist eine Optimierung der Zugtrajektorien nicht nur für einzelne Züge interessant, sondern im Sinne einer verbesserten Kapazitätsnutzung der Strecke auch für das Infrastrukturunternehmen (vgl. Abbildung 1).

Zur Unterstützung der Fahrerassistenzsysteme entwickelt die DB Netz AG bereits die Grünen Funktionen der Zuglaufregelung [1, 14, 15]. Darin werden zunächst kostenpflichtig die Funktionen „Planfahren“, d. h. Fahren nach vorgegebener Geschwindigkeitskurve und Aufbau einer Zeitreserve nutzen und „Nachfahren“, bedeutet, ein langsamerer Zug ist voraus, für genau definierte Streckenabschnitte zur Verfügung gestellt. In der Testphase befinden sich die Funktionen „Fahrzeit kürzen vor Langsamfahrstellen“ und die Bereitstellung von Durchfahrtintervallen an bestimmten Streckenpunkten.

Durch eine Vernetzung der einzelnen FAS können somit weitere betriebliche Situationen im Eisenbahnbetrieb effizienter gestaltet werden. Diese sind im Folgenden:

- Blockabschnittsräumung
- Folgefahrt bzw. Nachfahren (über einen langen Streckenabschnitt)
- Überholung
- Zugkreuzung (auf eingleisigen Strecken)
- Fahrstraßenausschluss

Im ersten Fall können betriebliche Echtzeitdaten dazu genutzt werden, die Trajektorie eines einzelnen Zuges weiter zu optimieren, indem zum Beispiel ein Halt aufgrund eines belegten Blockabschnitts vermieden wird. Stattdessen werden über die Vernetzung der FAS und über die bekannten Fahrdaten des vorausfahrenden Zuges der Zeitpunkt für die Fahrtstellung des Signals vorausberechnet und ein Ausrollen eingeleitet, das den Zug ohne Halt zum richtigen Zeitpunkt bis zum Signal bringt, sodass nach Aufwertung des Signalbegriffs direkt wieder beschleunigt werden kann (vgl. Abbildung 5).

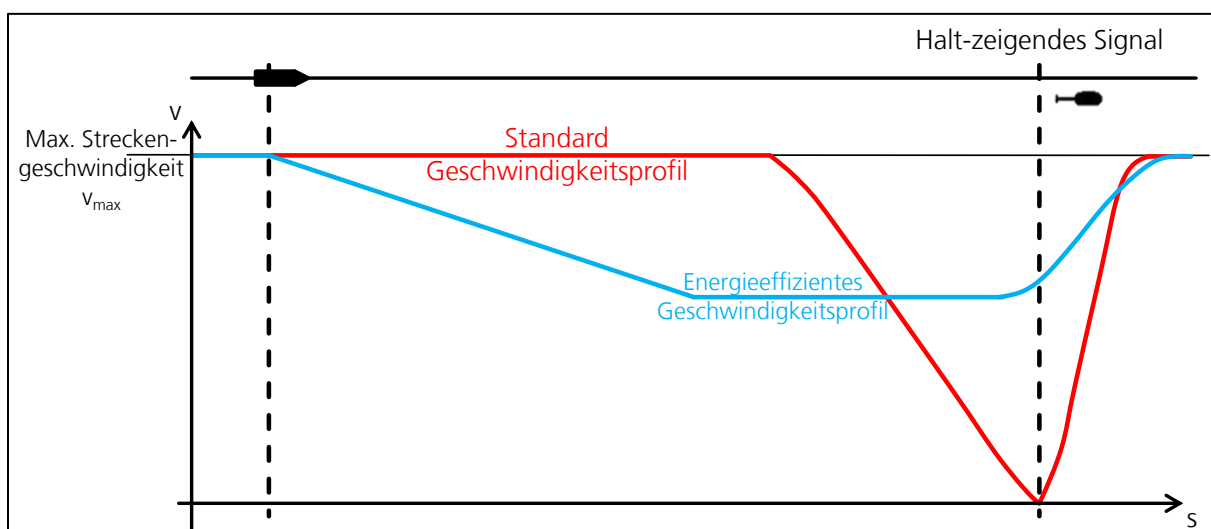


Abbildung 5: Schematische Darstellung der energieoptimierten Fahrweise im Fall der Blockabschnittsräumung (DLR)

Wie schon bei der Optimierung einer einzelnen Fahrtrajektorie kann bei dem hier beschriebenen Betrachtungsfall der Blockabschnittsräumung ebenfalls das Geschwindigkeitsprofil des hinteren Zuges auf eine energiesparende Fahrweise oder auf eine Fahrweise zum Verspätungsabbau

angepasst werden. Eine untergeordnete, aber dennoch zu berücksichtigende, Rolle spielt die mögliche Kapazitätsmaximierung auf dem zu betrachtenden Streckenabschnitt. Grund hierfür ist der wegfallende Halt am Signal, eine daraus resultierende geringere Fahrzeit im entsprechenden Blockabschnitt sowie eine Harmonisierung der Geschwindigkeiten auf dem zugehörigen Streckenabschnitt.

Der Ansatz für den Betrachtungsfall der Folgefahrt stellt einen Sonderfall zu der gerade beschriebenen Blockabschnittsräumung dar. Er kann wie folgt beschrieben werden. Bei einer längeren Folgefahrt kann im besten Fall eine Harmonisierung der Geschwindigkeiten beider Züge durch vFAS erfolgen. Hierbei kann sowohl die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Zuges erhöht, als auch die des nachfolgenden Zuges verringert werden. Es hängt in beiden Fällen von den zugsspezifischen, fahrdynamischen Eigenschaften ab, welche Option präferiert wird. Beispielsweise muss die Geschwindigkeit des nachfolgenden Zuges verringert werden, wenn der vordere Zug keine Geschwindigkeitsreserven aufweist, um schneller zu fahren. Liegen beim vorderen Zug jedoch noch Reserven vor und hat der hintere Zug eine höhere Ladungsmasse, kann es sinnvoller sein, den vorderen Zug zu beschleunigen, damit der schwerere Zug seine Geschwindigkeit beibehalten kann.

Wird der Gedanke der soeben beschriebenen Betrachtungsfälle konsequent zu Ende verfolgt, kann es betrieblich sinnvoller sein, einen Reihenfolgetausch der Züge über die Leiste vorzunehmen und im Sinne der Vernetzung auf dem vFAS anzuzeigen. Zwei Züge folgen sich kontinuierlich auf einem Streckenabschnitt. In dem Moment, wo ein Reihenfolgetausch sinnvoll wird, z. B. bei einem regulären Halt des vorausfahrenden Zuges, und dieser seine Geschwindigkeit reduzieren muss, kann auch hier der nachfolgende Zug seine Geschwindigkeit durch energetisches Ausrollen vermindern. Zu dem prognostizierten Zeitpunkt an dem der vorausfahrende Zug in das Überholgleis geleitet wird und die Fahrstraße wieder aufgelöst ist, kann der nachfolgende Zug wieder beschleunigen. Einen weiteren Sonderfall stellt dann die energiesparende Fahrweise dar. Hier muss durch den durchgeführten Reihenfolgetausch darauf geachtet werden, dass der hintere Zug keinen Nachteil hinsichtlich des neuen vorausfahrenden Zuges hat. Dieser kann in Abhängigkeit seiner maximalen Geschwindigkeit und der anberaumten Haltezeit des zu überholenden Zuges nur eine vom System zu ermittelnde Zeit zur Optimierung seiner Fahrtrajektorie nutzen. Weiter kann, wie es bei der Eisenbahnbetriebswissenschaft üblich ist, ein Optimum der Leistungsfähigkeiten ermittelt werden und ebenso kann eine solche Überholung einen Vorteil zum Verspätungsabbau bieten.

Gerade auf eingleisigen Strecken wird der Anwendungsfall der Zugkreuzungen relevant (vgl. Abbildung 6). Voraussetzung hierfür sind Überleitstellen bzw. Überholbahnhöfe, welche diese Eingleisigkeit temporär auf eine Zweigleisigkeit ausweiten. Begegnen sich zwei Züge auf einer eingleisigen Strecke, so müssen die Kreuzungen zwangsweise in einem Bahnhof oder einem zweigleisigen Streckenabschnitt stattfinden.

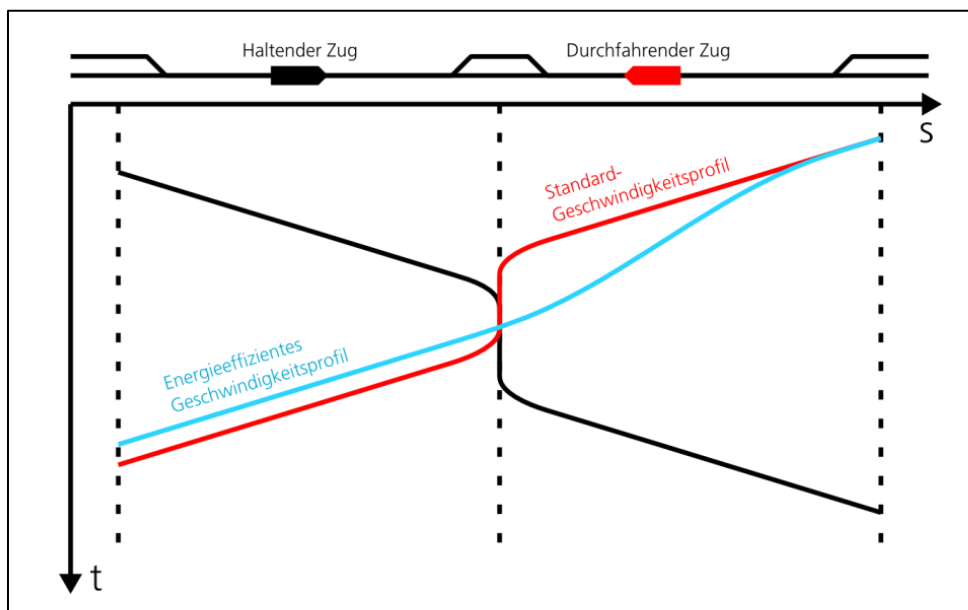


Abbildung 6: Schematische Darstellung einer energieoptimierten Zugkreuzung (DLR)

Als letzter Betrachtungsfall soll das Weichenvorfeld an einem Bahnhof dienen. Da hier über die Sicherungstechnik insbesondere über die Fahrstraßenlogik und die entsprechenden Verschlussregister nur bestimmte Fahrstraßen möglich sind, kann ein vFAS auch hier einen Anreiz vor allem für die Kapazitätsmaximierung bieten. Durch die Vernetzung und die Informationen über die jeweiligen Zugfahrten in einem Bahnhofsvorfeld besteht unter anderem die Möglichkeit einer Teilfahrstraßenauflösung. Diese frühzeitige Auflösung muss die jeweiligen Restriktionen aus der Sicherungstechnik (z. B. Flankenschutz) weiterhin berücksichtigen. Darauf aufbauend kann es möglich sein, weitere Zugfahrten zu planen und zuzulassen.

Bei allen bisherigen Betrachtungsfällen wurde von einem 2-Zug-Modell ausgegangen. Jedoch bietet der letzte Fall die Möglichkeit, auch ein Mehrzugmodell und ein damit von Niebel in [16] beschriebenes 3-Zug-Modell zu betrachten. Dadurch kann das sogenannte Zacken-Lücken-Problem berücksichtigt werden. Bei einem Zacken-Lücken-Problem kann ein weiterer Zug auf einem Teilabschnitt eine Lücke zwischen zwei Zügen, deren Sperrzeitentreppen bereits aneinander stoßen, ausnutzen und so die Kapazität des Streckenabschnitts optimal ausnutzen [17]. Dieser Fall kann beispielsweise bei der Ein- oder Ausfädelung von Zügen im Zulauf eines Bahnhofs auftreten.



Eine Zusammenfassung der betrieblichen Situation mit den entsprechenden Zielen ist in nachfolgender Tabelle 1 dargestellt.

Betriebliche Situation	FAS	vFAS	Energiesparen	Verspätungsabbau	Kapazitätsmaximierung
Opt. Fahrtrajektorie	X	-	X	(X)	-
Blockabschnittsräumung	-	X	X	X	(X)
Folgefahrt / Nachfahren	-	X	X	-	X
Zugüberholung	-	X	(X)	X	X
Zugkreuzung	-	X	(X)	X	-
Fahrstraßenausschluss	-	X	(X)	(X)	X

„X“ = direkter Einfluss; „(X)“ = indirekter Einfluss; „-“ = kein Einfluss

**Tabelle 1: Betriebliche Situationen mit angestrebten Optimierungszielen**

Im Falle von Verspätungen wird jedoch oftmals versucht, diese um jeden Preis wieder abzubauen. Dennoch kann es möglich sein, dies mit einer gleichzeitig energieeffizienten Fahrweise zu kombinieren. Darüber hinausgehende Effekte wie die Maximierung der Leistungsfähigkeit in einem Eisenbahnnetz können jedoch nur durch vFAS erzielt werden, da hierfür zusätzliche Informationen für eine optimale Fahrweise notwendig sind.

### 3. Datenverfügbarkeit für Fahrerassistenzsysteme

Dieses Kapitel beschreibt zunächst die benötigte Datengrundlage für bestehende FAS. Im Anschluss werden weitere, für FAS noch ungenutzte, Datenquellen analysiert und es wird beschrieben, inwiefern die so gewonnenen Daten einen Mehrwert für EVU oder Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) im Sinne von neuen Funktionen für ein FAS, sowie deren Vernetzung mit einer Leitstelle oder mit weiteren Zügen, ermöglichen. Da eine neue Datengrundlage auch eine Erweiterung von möglichen und ergänzenden Funktionen bietet, werden diese ebenfalls beschrieben und abschließend eine Bewertung hinsichtlich der entsprechenden Komplexität als auch des zu erwartenden Nutzens vorgenommen.

#### 3.1. Analyse von Input-Faktoren und Schnittstellen

Für die Identifikation und die Beschreibung der zur Verfügung stehenden Daten für FAS wurde zunächst eine Analyse der vorhandenen Eingangsgrößen von FAS am Beispiel des Systems „smart-trains.das“ der Firma INAVET [6], der „Grünen Funktion“ der DB Netz AG [1] sowie dem Tool „Operatives Verkehrsmanagement“ des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt [18] vorgenommen. Weiter wurde die Datengrundlage über die Systeme Fassi (DB Systel) [7, 19] und LEADER (DB Cargo) [20] ergänzt. Diese Eingangsgrößen wurden in einem gemeinsamen Workshop mit Teilnehmern des beteiligten Verkehrsunternehmens ODEG validiert und ergänzt. Triebfahrzeugführer sowie Ausbilder bewerteten aus ihrer Sicht den Nutzen von im Einsatz befindlichen FAS.

##### 3.1.1. Allgemeines Vorgehen zur Beschreibung der Datengrundlage

Die Unterteilung der ermittelten und verwendeten Daten erfolgt zunächst hinsichtlich ihrer Verwendung innerhalb eines FAS. Außerdem wurde unterschieden, ob die Daten bereits auf dem Display des FAS dargestellt werden und somit direkt für den Anwender ersichtlich sind, oder ob es sich um sogenannte Hintergrundinformationen handelt. Letztere werden für die Weiterverarbeitung bzw. die Erstellung einer entsprechenden Fahrempfehlung benötigt. Bei der Datenanalyse wurde weiterhin auf die Verfügbarkeit, also auf den Datenursprung, die Qualität und die Nutzbarkeit geachtet.

Folgende Abbildung 7 skizziert das angewendete Vorgehen zur Klassifizierung der Inputdaten.

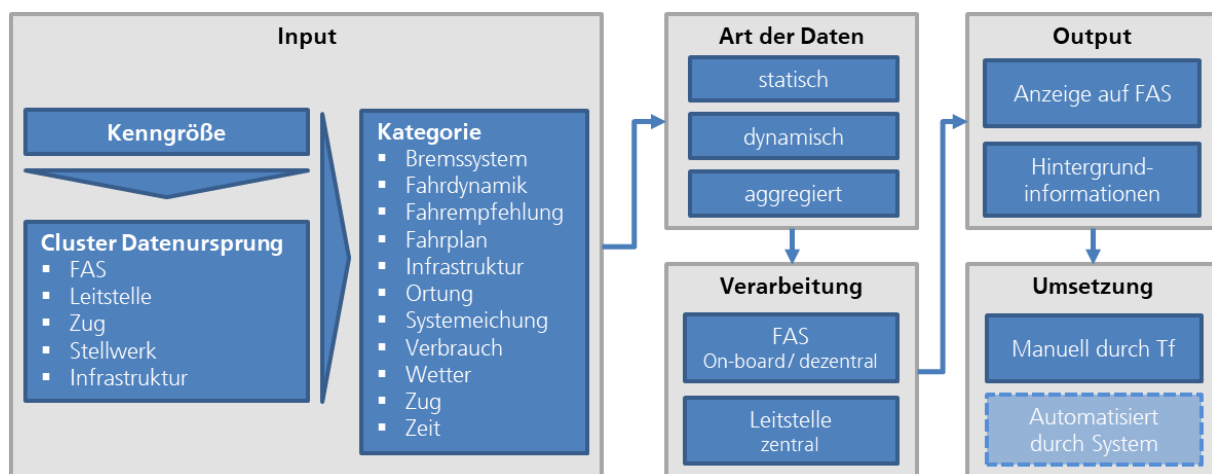


Abbildung 7: Schematische Darstellung vom Datenursprung zur Fahrempfehlung



Die Kenngröße an sich beschreibt die für die FAS benötigten Grundlagen oder darzustellenden Inhalte, welche beispielsweise Messgrößen, berechnete Werte aus verschiedenen Datenquellen oder Informationen für den Triebfahrzeugführer (Tf) sein können. Jede Kenngröße wird, wenn möglich, mit entsprechender Einheit angegeben und hinsichtlich ihres Datenursprungs in ein übergeordnetes Cluster einsortiert. Das Cluster gibt an, wo die Systeme des Datenursprungs angesiedelt sind. Weiter werden die Kenngrößen, wie folgt, einer detaillierteren Kategorie zugeordnet (vgl. Abbildung 7).

Im Folgenden werden die Kenngrößen hinsichtlich der Art der Daten zusammengefasst. Dabei kann es sich um statische, dynamische oder aggregierte Daten handeln. Als statisch werden Daten definiert, welche einmal dem FAS zur Verfügung gestellt werden und keine kontinuierliche, dynamische Anpassung erfahren müssen. Beispielsweise zählen zu den statischen Daten fahrdynamische Datenblätter, welche u. a. die maximale Traktionsleitung angeben oder ein fixer Referenzpunkt. Den dynamischen Daten kann beispielsweise die Zugposition zugeordnet werden. Aggregierte Daten beschreiben Inputfaktoren, welche sich aus mehreren Informationen zusammensetzen und als Zwischen- oder Teilergebnis Anwendung finden. Die Berechnung der Entfernung zu einem nächsten Referenzpunkt lässt sich beispielsweise über die Position des Zuges (dynamischer Wert) und der Position des Referenzpunktes (statischer Wert) ermitteln. In diese drei Unterteilungen werden die Ursprungssysteme weiter differenziert, um weitere Informationen über den Datenursprung zu geben.

In dieser Studie unberücksichtigt, aber für die Erstellung einer Fahrempfehlung relevant, ist die Unterteilung, ob es sich bei der Art des FAS um ein zentrales oder dezentrales System handelt (vgl. Abbildung 7). Zentral bedeutet hierbei, dass die Optimierung und die Erstellung einer Fahrempfehlung gebündelt, also beispielsweise in einer Betriebszentrale, erstellt wird und lediglich als Information an das FAS und damit an den Zug gesendet wird. Alternativ kann auch das FAS auf dem Zug die entsprechende Optimierung vornehmen, was als dezentral oder on-board bezeichnet wird. [11]

Wie eingangs bereits beschrieben wurde, kann die Fahrempfehlung im Anschluss als Output unmittelbar auf dem FAS oder mittelbar als Hintergrundinformation angezeigt bzw. dem Triebfahrzeugführer zur Verfügung gestellt werden. Dieser setzt dann die vorgeschlagene Empfehlung um. In Abbildung 7 ist im Zuge der voranschreitenden Automatisierung ebenfalls schon eine automatisierte Umsetzung einer Fahrempfehlung durch ein System dargestellt, da die entsprechenden Optimierungsalgorithmen sowohl durch eine menschliche Tätigkeit (Tf) als auch zukünftig durch ein unmittelbare, automatisierte Ansteuerung der Fahr- und Bremssteuerung erfolgen kann.

Auf der Basis dieser Vorüberlegungen sind die nachfolgenden Tabellen nach folgendem Grundschema aufgebaut (vgl. Tabelle 2).

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert

**Tabelle 2: Grundschema der Datenaufbereitung**

Zunächst erhält jede dargestellte Kenngröße eine feste ID, welche eine Zuordnung im Text in runden Klammern, einen Vergleich der im Anhang vollständig aufgelisteten Inputparameter sowie eine Berücksichtigung der jeweiligen Kenngrößen zu den Optimierungszielen (vgl. Abschnitt 3.2) ermöglicht. Da die Inputparameter zunächst alphabetisch nach der Kategorie und dann nach der

jeweiligen Kenngröße sortiert wurden, kann es sein, dass diese im Text und den nachfolgenden Tabellen nicht zwangsweise in einer fortlaufenden Nummerierung beschrieben werden.

### 3.1.2. Kenngrößen für bestehende Fahrerassistenzsysteme

Die Informationen, welche als Output eines FAS zur unmittelbaren Anzeige auf dem Display dargestellt werden können, sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Derzeitige FAS geben dem Triebfahrzeugführer notwendige Informationen, welche auf dem nachfolgenden Streckenabschnitt berücksichtigt werden sollen oder aus welchem Grund eine Fahrempfehlung angestoßen werden soll. Als Information zur Art des Ereignisses (26) kann beispielsweise die Folgefahrt, das Überholen eines anderen Zuges oder eine Zugkreuzung genannt werden.

Die optimale Fahrgeschwindigkeit (30) gibt dem Tf die Empfehlung, mit der das Optimierungsziel, i. d. R. die Optimierung des Energiebedarfs unter Berücksichtigung der Fahrplanlage (Verspätung / Verfrühung) erreicht werden kann. Daraus kann unter anderem als Fahrempfehlung das rechtzeitige Ausrollen (28) zur Geschwindigkeitsreduktion, erfolgen.

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
26	Art des Ereignisses als Information	-	Fahrempfehlung	FAS Leitstelle			
28	Ausrollen	Ja / Nein	Fahrempfehlung	FAS Leitstelle			Berechnung System
30	Fahrgeschwindigkeit (optimal)	Km/h	Fahrempfehlung	FAS Leitstelle			Berechnung System
34	Korridor Durchfahrzeit	hh:mm:ss	Fahrempfehlung	Leitstelle Zug			Durchfahrzeit (früh. / spät.)
37	Zeitl. Gültigkeit (Start / Ende)	hh:mm:ss	Fahrempfehlung	FAS Leitstelle	Systemoutput		
39	Abfahrzeit Bahnhof	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan (Soll) RUT-K EBUa	LeiDis (Ist)	Abh. v Mindesthaltezeit, Fahrplanlage & Geschwindigkeit
40	Ankunftszeit Bahnhof	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan (Soll) RUT-K EBUa	LeiDis (Ist)	verbleibende Zeit, abh. von Fahrplanlage & Geschwindigkeit
47	Haltezeit / Mindesthaltezeit	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan (Soll) RUT-K EBUa	LeiDis (Ist)	
52	Reserve zum nächsten Referenzpunkt	hh:mm:ss	Fahrplan	FAS Leitstelle			Berechnung System
69	Entfernung zum nächsten Referenzpunkt	m	Ortung	Leitstelle Zug	Referenzpunkte auf Strecke	GPS	Berechnung aus Position Zug und Referenzpunkt
88	Ist-Zeit System	hh:mm:ss	Zeit	FAS Leitstelle		GPS Back-office Systeme	Abgleich mit Bahnhofsuhr

**Tabelle 3: Informationen zur unmittelbaren Anzeige auf einem FAS mit Datenursprung**

Ebenfalls finden verschiedene Zeitvorgaben in den Fahrempfehlungen Berücksichtigung. Hierzu zählt die zeitliche Gültigkeit einer Empfehlung (37) sowie die IST-Zeit des Systems (88), mit der

sichergestellt wird, dass keine veralteten Anweisungen gegeben werden, welche zu einem widersprüchlichen Ergebnis führen. Letzteres beeinflusst maßgeblich auch die Akzeptanz der Tf. Weitere Zeitvorgaben sind die Ankunfts- (40) oder Abfahrtszeiten (39) am nächsten Bahnhof sowie die zugehörige (Mindest-)Haltezeit (47). Bestehende FAS nutzen anstelle von reinen Vorgaben für die Fahrempfehlung in Form einer reinen Geschwindigkeitsangabe auch die Möglichkeit eine früheste oder späteste mögliche Durchfahrtszeit, in Abhängigkeit eines konfliktfreien Fahrplans, vorzugeben. In diesem Korridor (34) kann der jeweilige Zug dann selbstständig seine optimale Fahrweise errechnen und umsetzen [21].

Die oben bereits beschriebene Abweichung zur Fahrplanlage in Form einer Fahrplanreserve (Verfrühung) oder eine Verspätung kann über die zeitliche Reserve bis zum nächsten Referenzpunkt (52) dem Tf mitgeteilt werden. Als letzter Punkt dient die verbleibende Entfernung zum nächsten Referenzpunkt (69), da über diese u. a. eine Validierung der Fahrempfehlung durch den Tf erfolgen kann.

Die in nachfolgender Tabelle 4 dargestellte Kenngrößen sind im Vergleich zur Tabelle 3 zusätzliche Informationen, welche dem Tf zur Verfügung stehen können. Um die Fülle der Informationen für den Tf auf einem annehmbaren Niveau zu belassen, sollten diese nicht immer unmittelbar auf dem Display des FAS angegeben werden, sondern können auch in Untermenüs dargestellt werden. Der Tf kann so bei Bedarf diese Informationen manuell aufrufen.

Vorneweg können hier Ausnahmen (27) z. B. aufgrund fehlender Datenlage oder Begründungen zu den Fahrempfehlungen aufgerufen werden. Bspw. können das hochbelastete Streckenäste sein, bei denen die Abwicklung eines reibungslosen Betriebs vor der Energieeinsparung eines einzelnen Zuges steht, oder Gebiete, in denen die Übertragungsmöglichkeiten für die Fahrempfehlung nicht gewährleistet sind.

Weiterhin kann über die Ausgabe des Geschwindigkeitsdeltas zwischen der optimalen Soll-Geschwindigkeit (30) (vgl. Tabelle 3) und der Ist-Geschwindigkeit des Zuges (11) (vgl. Tabelle 6) dem Tf eine vereinfachte Darstellung gegeben werden, wie stark er beschleunigen oder abbremsen muss, damit die Empfehlung zielführend umgesetzt werden kann. Diese Form der Darstellung kann auch in Form von Zeit-Weg-Linien visualisiert (36) werden.

Ebenfalls zählen zu den Zusatzinformationen zeitgebundene Kenngrößen, welche nicht nur die zeitliche Gültigkeit der versendeten Fahrempfehlung (vgl. Tabelle 3) beinhalten, sondern auch einen Zeitstempel der versendeten Nachricht (38). Auch Regelhaltezeiten (48) oder Abhängigkeiten zu anderen Zügen (Verspätungen) (56) können dem Tf hier zur Verfügung gestellt werden.

Für die Ermittlung der genauen Halteposition ist die Kenntnis über die Länge des Bahnsteiges von Bedeutung (60) und für Zwecke der Ortung u. a. die Lage von Referenzpunkten (69 bis 71), mit denen eine Messstrecke mit Start und Ende festgelegt werden kann. Weiterhin kann auch die Entfernung zum letzten Referenzpunkt (68) ausgegeben werden, mit der eine Kalibrierung der Fahrempfehlung möglich ist. Zusätzlich sind die Positionsdaten des betroffenen Zuges sowie die Entfernung zu Referenzpunkten oder anderen Zügen oder die Regionalberichtsnummer (72 bis 75) von Relevanz.

Die letzten Kenngrößen sind der Kategorie „Verbrauch“ zugeordnet. Hierzu zählen der aktuelle Energiebedarf (77), welcher auch wegbezogen (79) ausgegeben werden kann und die aktuellen Bedarfe aller Nebenverbräuche (81).

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
27	Ausnahmen	-	Fahrempfehlung	FAS			
32	Geschwindigkeit; delta	km/h	Fahrempfehlung	FAS			aktuelle Geschwindigkeit zu Empfehlung bzw. Streckenvorgabe
36	Visualisierung	-	Fahrempfehlung	FAS		lokale Berechnung	Output / Berechnung
38	Zeitstempel Versand der Nachricht	hh:mm:ss	Fahrempfehlung	FAS	Output		
48	Haltezeit / Regelhaltezeit (Soll)	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan (Soll-Wert)		
56	Verspätung vorausfahrender Züge	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle		LeiDis (Ist-Wert)	
60	Bahnsteig und Haltepositionen	m	Infrastruktur	FAS	Spurplan	Ortung	Ortung und Spurplan
68	Entfernung zum letzten Referenzpunkt	m	Ortung	Zug / Leitstelle	Referenzpunkte auf Strecke	GPS-Antenne	Berechnung aus Zugposition und Referenzpunkt
70	Örtl. Referenzpunkt; Ende	km	Ortung	FAS	Balisen	GPS-Antenne	
71	Örtl. Referenzpunkt; Start	km	Ortung	FAS	Balisen	GPS-Antenne	
72	Position / Streckenkilometer	m / km	Ortung	Zug / Leitstelle			
73	Regionalbereichsnummer	1 - 8	Ortung	Stellwerk / Leitstelle			
74	Zugposition	km / Koordinaten	Ortung	Zug / Leitstelle	Zug: LZB-Rechner; ETCS OBU (ETCS (> L2))		
75	Zugposition Entfernung zu einem vorausfahrenden Zug	km	Ortung	Stellwerk: Zuglaufregelung (ZLR)"	GPS-Antenne / Odometer		
77	Energie / Kraftstoff (aktueller)	kWh / l	Verbrauch	Leitstelle / Zug		LeiDis	eigene Position
79	Energie / Kraftstoff (wegbezogen)	kWh/100 km l/100km"	Verbrauch	Zug		TEMA-Box / Motorsteuergeräte / Durchflussmesser	
81	Nebenverbräuche	kWh / l	Verbrauch	Zug			Berechnung Verbrauch zu zurückgelegtem Weg

**Tabelle 4: Zusatzinformationen zur Anzeige auf einem FAS**

Zur Bestimmung der in Tabelle 3 und Tabelle 4 dargestellten Output-Größen, sind die bereits beschriebenen Fahrzeug-, Fahrplan- und Infrastrukturdaten notwendig. Die fahrzeugbezogenen Eingangsgrößen, welche sich auf das Bremssystem beziehen, können demnach wie folgt

zusammengefasst werden und bestehen im Wesentlichen aus dem Bremsgewicht (1), den Brems-hundertsteln (2), der Bremsstellung (4) sowie dem vorhandenen Bremssystem des Zuges (5) (vgl. Tabelle 5).

ID	Kenngröße	Einheit	Katego- rie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
1	Bremsgewicht	%	Brems-system	Zug	experimentell bestimmt / techn. Datenblatt		
2	Bremshundertstel	%	Brems-system	Zug	Zug		Bremsgewicht; Masse des Zuges
4	Bremsstellung	R, P, G	Brems-system	Zug	Feldbussystem		
5	Bremssystem des Zuges	E, P, Mg, ...	Brems-system	Zug	vorhandene Systeme des Zugs / fahrdyn. Datenblätter	aktuelle Auswahl des Systems (Bordgerät)	Berechnung der aktuellen Zug-Bremskurven

**Tabelle 5: Eingangsgrößen des Bremssystems**

Die Inputgrößen für ein FAS, welche primär die Fahrdynamik betreffen, befinden sich in nachfolgender Tabelle 6. Insbesondere ist die Geschwindigkeit des Zuges, sowohl die maximale (12), als auch die aktuelle (11) für die Ermittlung der fahrdynamischen Eingangsgrößen relevant, da auf deren Basis die entsprechenden fahrdynamischen Kräfte nach [22] berechnet werden.

Als Berechnungsgrößen gelten die zur Verfügung stehende Beschleunigungs- (7) und Bremskraft (10) des Triebfahrzeugs. Hierfür sind die Traktionsleistung (18 und 21) bzw. die Zugkraft in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, die Masse des Zuges (14 bis 16 und 22), sowie weitere fahrdynamische und bremspezifische Informationen notwendig. Zu letzteren gehören im Allgemeinen das Bremssystem inklusive der Bremsstellung (4), die vorhandenen Brems-hundertstel (2) und die Information, ob eine elektrische Bremse vorhanden ist bzw. zugeschaltet wird (5), welches bereits in Tabelle 5 dargestellt wurde.

Weiterhin sind auch streckenspezifische Widerstände, wie die der Neigung (19) oder der Fahrt in einem Bogen (9), sowie wagenspezifische Widerstände (23) für die Ermittlung der entsprechenden Fahrdynamik relevant.

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
6	Anfahrzugkraft (max.)	kN	Fahrdynamik	Zug	fahrdyn. Datenblätter		
7	Beschleunigungsvermögen	m/s <sup>2</sup>	Fahrdynamik	Zug	fahrdyn. Datenblätter		Fahrdyn. Berechnung
9	Bogenwiderstand	N / kN	Fahrdynamik	FAS / Infrastruktur			Berechnung
10	Bremsvermögen	m/s <sup>2</sup>	Fahrdynamik	Zug	fahrdyn. Datenblätter		abh. v. Bremssystem, Masse und Streckenprofil
11	Fahrgeschwindigkeit (aktuell)	km/h	Fahrdynamik	Zug		Messwerte Bordsystem / Feldbussystem	GPS
12	Fahrgeschwindigkeit (maximal, Zug)	km/h	Fahrdynamik	Zug	fahrdyn. Datenblatt		
13	Fahrwiderstände Zug	N / kN	Fahrdynamik	Zug	Länge, aerodyn. Beiwerte, Lagerreibung	Masse, Geschwindigkeit (ist)	Widerstandskraft Zug
14	Gewicht Zug (netto)	t	Fahrdynamik	Zug	techn. Datenblatt		
15	Lastverteilung		Fahrdynamik	Zug			
16	Massefaktor	-	Fahrdynamik	Zug	fahrdyn. Datenblätter		
17	Motor-Drehzahl (max, aktuell, Korrektur)	UpM	Fahrdynamik	Zug	techn. Datenblatt (max)	Feldbussystem / (akt.) Messwerte	Korrektur: Abgleich Messwandler (Soll/Ist)
18	Motorleistung (max, aktuell, Korrektur)	kW	Fahrdynamik	Zug	techn. Datenblatt (max)	Feldbussystem / (akt.) Messwerte	Korrektur: Abgleich Messwandler (Soll/Ist)
19	Neigungswiderstand	N / kN	Fahrdynamik	FAS / Infrastruktur			Berechnung aus Neigung und Masse des Zuges
21	Traktionsleistung; maximum	kW	Fahrdynamik	Zug	fahrdyn. Datenblätter / experimentell bestimmt		
22	Traktionsleistungsbedarf	Kwh	Fahrdynamik	Zug			Berechnung auf Basis der Fahrgeschwindigkeit
23	Widerstände Wagenpark	N / kN	Fahrdynamik	Zug	Messwerte / fahrdyn. Datenblätter	Sensorik	Berechnung
24	Zugkraft	kN	Fahrdynamik	Zug	fahrdyn. Datenblätter		Berechnung abh. von Geschwindigkeit

**Tabelle 6: Eingangsgrößen für die fahrdynamische Berechnung**

Die infrastrukturellen Eingangsgrößen sind in Tabelle 7 aufgelistet und dienen unter anderem als Berechnungsgrundlage für die Fahrdynamik (vgl. Tabelle 6).

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
62	Höhenprofil / Neigungswechsel		Infrastruktur	Leitstelle	Spurplan / Messfahrten		
64	Neigung	‰	Infrastruktur	Zug			Abgleich Position und Höhenprofil
66	Signalposition	km	Infrastruktur	Leitstelle / Stellwerk	Spurplan		
67	Streckenkilometrierung	km	Infrastruktur	Leitstelle	Infrastrukturdaten / EBU-La-Fahrplan		

**Tabelle 7: Eingangsgrößen aus der Infrastruktur**

Hierzu gehören das Höhenprofil sowie die Position der Neigungswechsel (62), als auch die Neigung (64) selbst. Für die Ermittlung von Fahrzeiten innerhalb eines Blockabschnitts werden die Positionen von (Haupt-)Signalen (66) benötigt, da diese in der Regel die Blocklänge bestimmen. Die Streckenkilometrierung (67) dient unter anderem der Lokalisierung von Infrastrukturelementen als auch der Positionierung bzw. Ortung des Zuges.

Eingangsgrößen, welche den Zug betreffen und nicht einer weiteren Kategorie zugeordnet wurden, sind die Zuglänge (89) und die Zugnummer (91) (vgl. Tabelle 8). Erstere dient der Lokalisierung des Zugendes und kann bei der Prognose der Räumfahrzeit und damit der Blockbelegungszeit Anwendung finden. Die Zugnummer dient zur Identifikation der Fahrempfehlung für den entsprechenden Zug.

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
89	Zuglänge	m	Zug	Zug	fahrdyn. Datenblätter		
91	Zugnummer	-	Zug	Zug / Leitstelle	Eingabe aus Fahrplan / Anmeldung am System / landseitige Datenbank / Back-office-Systeme		

**Tabelle 8: Eingangsgrößen des Zuges**

Während die Eingangsgrößen der Tabelle 6 bis Tabelle 8 zur Ermittlung der jeweiligen Fahrtrajektorie sowie der Fahrzeit des Zuges auf einem Streckenabschnitt benötigt werden, gibt es für die Optimierung Zwangspunkte, welche sich aus Vorgaben des Fahrplans ergeben (vgl. Tabelle 9).

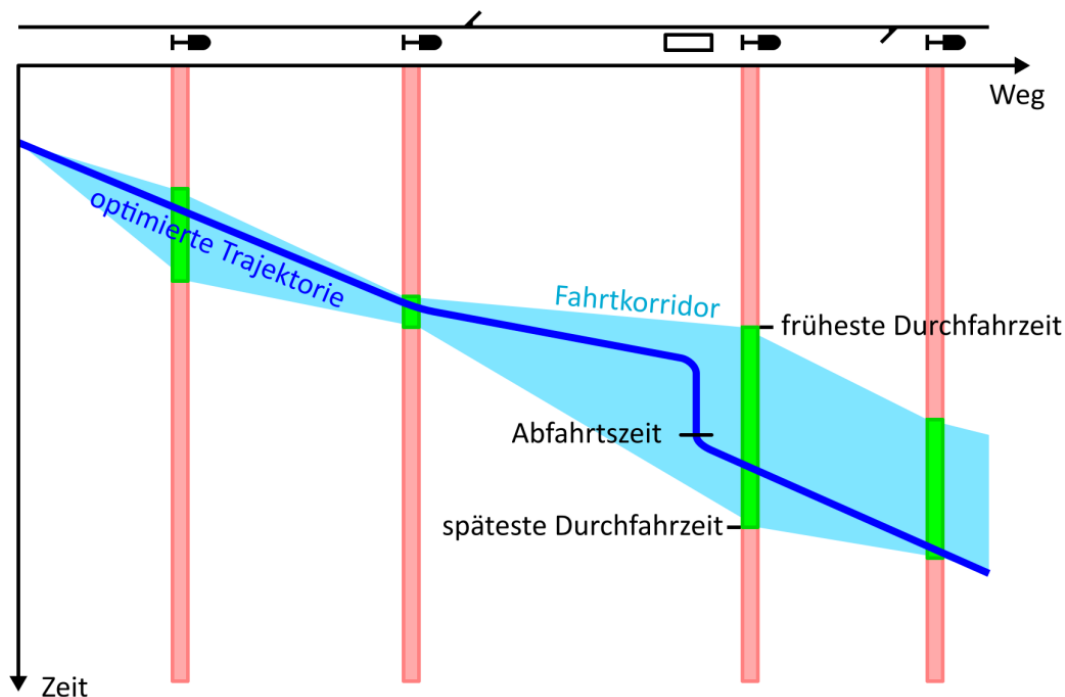
Zu den Eingangsgrößen aus dem Fahrplan gehören die aktuellen (IST)- und die geplanten (Soll)-Blockbelegungszeiten (41 und 42). Diese finden Anwendung in der Bestimmung der Durchfahrzeiten (44) für den entsprechenden Block und damit für eine Prognose der benötigten Zeit, bis ein Zug diesen geräumt hat und ein nachfolgender Zug in selbigen einfahren kann. Sind diese Zeiten bekannt, kann für den nachfolgenden Zug eine energieeffiziente Fahrempfehlung (FE) ausgegeben werden, ohne dass ein Bremsen vor dem haltzeigenden Signal erforderlich wird (vgl. Abschnitt 2.2, Abbildung 5).



ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
41	Blockbelegungszeiten (Ist-Wert)	s	Fahrplan	Leitstelle / Zug / Stellwerk		Stellwerk z.B. über Relais	
42	Blockbelegungszeiten (Soll-Wert)	s	Fahrplan	Leitstelle	RUT-K		
44	Durchfahrzeit (früheste)	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle / Zug		LeiDis (Ist-Wert)	Position mehrerer Züge / Fahrplanlage / Sperrzeiten
45	Durchfahrzeit (späteste)	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle / Zug		LeiDis (Ist-Wert)	Position mehrerer Züge / Fahrplanlage / Sperrzeiten
50	Langsamfahrstellen	km & km/h	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan / Betra		
53	Soll-Wert am Referenzpunkt	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	RUT-K / EBUa		
57	Zeit-Weg-Linie	-	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan	LeiDis (Ist-Wert)	Abweichungen (Soll/Ist)

**Tabelle 9: Eingangsgrößen aus dem Fahrplan**

Die beiden Punkte der frühesten (44) und spätesten (45) Durchfahrzeit an einem Referenzpunkt (vgl. Abbildung 8) sind vor allem für eine dezentrale, also on-board Berechnung der Fahrempfehlung im Zug erforderlich. Es wird also ein Korridor vorgegeben, wann der Zug zeitlich an einem Punkt im Streckennetz sein soll. Innerhalb dieses Korridors kann der Zug dann selbständig, die für ihn optimale, Fahrweise wählen und z. B. hinsichtlich Energieeffizienz oder Verspätungsminimierung optimieren. Zur Überprüfung seiner eigenen Fahrweise kommt der Soll-Wert am Referenzpunkt (53) hinzu (vgl. Tabelle 9).



**Abbildung 8: Schematische Darstellung einer innerhalb eines Korridors optimierten Fahrweise**



Anpassungen im Fahrplan, welche durch Langsamfahrstellen (50) hervorgerufen werden, sind ebenfalls in die aktuelle Optimierung zu integrieren. Als Visualisierung kann die aktuelle Zeit-Weg-Linie (57) verwendet werden, welche sowohl die Ist-Daten als auch die Soll-Daten grafisch darstellt, um so ein schnelles Situationsbewusstsein beim Tf zu schaffen. Unter anderem wird für die Darstellung der geplante Wert am Referenzpunkt (53) benötigt, um diesen mit der tatsächlichen Zeit des Zuges am selbigen abzugleichen.

Da ein Optimierungsziel für FAS die energiesparende Fahrweise ist, werden Kenngrößen benötigt, die den Bedarf an Energie bzw. Kraftstoff beschreiben und in Tabelle 10 zusammengefasst werden. Dies ist vor allem für die Evaluierung der Energieeinsparung und den Vergleich von Zugfahrten von Interesse. Für eine Minimierung des Traktionsenergieverbrauches werden lediglich fahrdynamische und infrastrukturelle Parameter benötigt (vgl. Tabelle 6 und Tabelle 7).

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
78	Energie / Kraftstoff (spezifischer)	kWh / l	Verbrauch	Zug	techn. Datenblatt		Berechnung aus Fahr-Bremshebel, Drehmoment / bei Messreihen
80	Leerlauf	kW / l/s	Verbrauch	Zug			
82	Rekuperation (maximal)	kW	Verbrauch			Feldbussystem (akt.) / TEMA-Box	
83	Rückspeisequote	%	Verbrauch				Berechnung
84	Tankdaten	l	Verbrauch	Zug			

**Tabelle 10: Eingangsgrößen aus dem Verbrauch des Zuges**

Mithilfe mathematischer Modelle kann eine Optimierung auch ohne Kenntnis realer Energieverbräuche erfolgen, jedoch sind durch die realen Verbräuche als Korrekturwerte die berechneten Werte besser prognostizierbar. Zu den Verbrauchskenngrößen zählen die spezifischen Energiebedarfe (78) bei Elektrolokomotiven bzw. der Kraftstoffbedarf bei Diesellokomotiven. Weiterhin sind Informationen über den Verbrauch, während sich das Fahrzeug im Leerlauf (80) befindet, relevant, da für eine energiesparende Fahrweise auch das Abschalten des Fahrzeuges eine Optimierungsmöglichkeit darstellen kann [23].

Mit der Rekuperation (82) und der Rückspeisequote (83) wird die Menge an Energie beschrieben, welche bei einer Bremsung mit elektrischer Bremse zurückgewonnen und wieder in das Bahnstromnetz eingespeist werden kann. Die Tankdaten (84) können, wie auch alle weiteren Korrekturwerte (76) (vgl. Tabelle 11) zur Eichung des Systems und der Ermittlung der tatsächlichen Kenngrößen herangezogen werden. Die entsprechenden Kenngrößen den Verbrauch betreffend, werden in nachfolgender Tabelle 10 aufgelistet.

Neben den Korrekturwerten (76) können als weitere sonstige Eingangsgrößen (vgl. Tabelle 11) wetterspezifische Größen genannt werden. Hierzu gehören Wettereinflüsse an sich (87), da sich hierüber die fahrdynamischen Eigenschaften der Züge verändern können und sich dadurch beispielsweise der Bremsweg verlängern oder verkürzen kann. Weiterhin sind die Temperaturwerte (86) für die Ansteuerung der Nebenverbraucher (81) ein möglicher Hilfwert für die Abschätzung des Energiebedarfs. Um die Temperaturwerte geografisch zuordnen zu können, ist die Lage der Temperaturmessstation (85) von Bedeutung.

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
76	Korrekturwerte		Systemeichung	Zug			Delta zwischen gemessenen und berechneten Werten
85	Position Messstation	-	Wetter	Extern	Standort		
86	Stündl. Temperaturwerte	°C	Wetter	Extern / Zug		DWD-Informationen / Sensorik am Zug	
87	Wettereinflüsse	-	Wetter	Extern / Zug		DWD-Informationen / Sensorik am Zug	

Tabelle 11: Sonstige Eingangsgrößen

### 3.1.3. Verfügbare Inputgrößen für eine Erweiterung von Fahrerassistenzsystemen

Im Zuge einer Erweiterung von FAS sollen Daten beschrieben werden, welche im Umfeld des Eisenbahnbetriebs bereits vorliegen, jedoch noch nicht oder nicht vollumfänglich in FAS verwendet werden. Diese Inputgrößen werden nach denselben Merkmalen wie in den vorhergehenden Abschnitten zusammengefasst (vgl. Tabelle 2) und beinhalten auch Einträge von Kenngrößen, welche für eine Erweiterung im Sinne einer Vernetzung benötigt werden.

Die in Tabelle 3 und Tabelle 4 dargestellten (Zusatz-) Informationen können durch weitere Informationen ergänzt werden, welche aktuell jedoch noch nicht in den betrachteten FAS vorgehalten werden und sich maximal in der Umsetzungsplanung befinden.

Die Informationen sind wiederum in unmittelbar darzustellende Informationen in Tabelle 12 und Zusatzinformationen in Tabelle 13 unterteilt worden. Die in Tabelle 12 dargestellten Funktionen sind eine möglich bzw. teilweise schon in der Planung befindliche Erweiterung bei den bestehenden FAS.

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
35	Leerlauf vermeiden	-	Fahrempfehlung	FAS			Abgleich Fahrplan & Position
46	Haltezeit Anpassung (IST)	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Tages- & Wochenganglinien	LeiDis (Ist)	
55	Verspätung	hh:mm:ss	Fahrplan	FAS Leitstelle			Berechnung System
65	Signalbild	-	Infrastruktur	Stellwerk FAS Leitstelle	Stellwerk		

Tabelle 12: Ungenutzte oder in der Entwicklung befindliche Informationen zur unmittelbaren Anzeige

Die Funktion „Leerlauf vermeiden“ (35) wird bereits beim System Fassi angedacht, um den Energiebedarf bei Stillstand des Zuges, vor allem in Abstell- oder Wendeeinrichtungen, zu reduzieren [23]. Dies hängt jedoch von jeweiligen Gegebenheiten ab. An kalten Tagen, wird beispielsweise der Fahrgastraum vorgeheizt, um dem Fahrgast einen entsprechenden Komfort bieten zu können.

Dafür wird jedoch der laufende Motor benötigt [24]. Andererseits ist bei geringen Haltezeiten ein Abschalten des Motors nicht zielführend, weshalb diese Funktion erst mit einem zeitlichen Versatz bzw. nach Abgleich mit entsprechenden Fahrplanreserven eingesetzt werden soll. Ein Optimierungskriterium kann hier sein, entweder schneller fahren, um bei einer längeren Wartezeit den Motor abzuschalten oder langsamer energiesparender zu fahren und den Motor nicht abzuschalten.

Eine Haltezeitanpassung (46) kann unter anderem durch ein erwartetes erhöhtes Verkehrsaufkommen an einer Station notwendig werden. Verlängert sich die Haltezeit durch bspw. viele Reisende mit Gepäck, Fahrrädern oder Rollstühlen bei mobilitätseingeschränkten Personen, reicht die im Fahrplan eingeplante Haltezeit in der Regel nicht aus und es ist wahrscheinlich, dass der Zug eine Verspätung erhält. Um diese Verspätung zu verringern, kann bei rechtzeitiger Information und entsprechendem Puffer im Fahrplan eine Vorplanfahrt durchgeführt werden, so dass der Zug früher am Bahnsteig ankommt. Als statische Inputdaten können bei dieser Erweiterung Erfahrungswerte aus den Tages- bzw. Wochenganglinien verwendet werden. Bei einer geplanten Abweichung vom Fahrplan muss die genaue Zugposition mit den aktuellen Fahrplandaten aus der Leitstelle abgeglichen werden und eventuell auftretende Konflikte mit anderen Zügen jedoch vermieden werden.

Die gerade beschriebene Ermittlung der Verspätungen (55) wird bei dem System LEADER angedacht bzw. befindet sich bereits in der Umsetzung [20]. Hierbei soll dezentral, also im Zug, eine genaue aktuelle Verspätung über den Abgleich der Position zur entsprechenden Fahrplanlage ausgegeben werden.

Die Darstellung des nächsten Signalbegriffs (65) kann über eine entsprechende Schnittstelle aus der Leitstelle bzw. eine Anbindung an die Leit- und Sicherungstechnik erfolgen. Im Prinzip ist dies eine identische Funktion, wie sie auch bei der Linienzugbeeinflussung (LZB) mit der Führerstands-signalisierung vorhanden ist. Da die LZB-Signalisierung jedoch nicht in allen Triebfahrzeugen bzw. auf allen Strecken vorhanden ist, besteht hier die Möglichkeit, diese Funktion in die FAS zu integrieren. Da es sich hierbei aber um ein sicherheitskritisches System handelt, muss jedoch sichergestellt werden, dass die entsprechende Umsetzung entsprechende regulatorische Vorgaben berücksichtigt.

Auch für die ungenutzten bzw. sich noch in der Entwicklung befindlichen Funktionen gibt es weitere Kenngrößen, die als Zusatzinformationen zusammengefasst werden können (vgl. Tabelle 13).

Die Zuladung bzw. der Besetzungsgrad (25) der Züge hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Fahrdynamik und kann statisch über entsprechenden Tages- bzw. Wochenganglinien für die Berechnung selbiger genutzt werden. Zur Ermittlung aktueller Werte sind auch dynamische Systeme verwendbar, hierzu zählen unter anderem Zähl- oder Messeinrichtungen wie Grünscheifen und automatische Fahrgastzählsysteme mit online Funktion unmittelbar im Zug oder aber auch Bildauswerteverfahren z. B. für Videosysteme.

Vergleichbar wie die Zuladung spielt das Fahrgastwechselaufkommen (29) eine maßgebliche Rolle bei der Durchführung einer Zugfahrt. Ist ersichtlich, dass an der nächsten Station sehr viele Fahrgäste den Zug verlassen bzw. zusteigen wollen, kann versucht werden die Haltezeit (46) anzupassen, indem eine Vorplanfahrt angestrebt wird. Die Erkenntnisse beruhen in der Regel auf Erfahrungswerten des Tf oder auf Tages- und Wochenganglinien. Zur Ermittlung des

Fahrgastwechselaufkommens ist hier anzudenken die Ticketsysteme und die Fahrkartenkontrollen als weiteren Datenursprung zu verwenden, um die aktuellen Zahlen über die verkauften Fahrkarten bzw. über die angetretenen Fahrten zu ermitteln. Über den Zielort können so auch die relevanten Umsteigepunkte identifiziert werden.

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
25	Zuladung des Zuges / Besetzungsgrad / beförderte Fahrgäste	t / %	Fahrdynamik	Zug	Tages- / Wochenganglinien	Messeinrichtung / Zähleinrichtungen / Videoauswertung	
29	Fahrgastwechselaufkommen	Pax	Fahrempfehlung	Leitstelle / Zug	Tages- / Wochenganglinien	Ticketsystem (Kontrolle)	
31	Fahrzeit längen / kürzen	-	Fahrempfehlung	TF / FAS	Aktiver Eingriff durch TF	Betriebslage / Fahrempfehlung	
33	Grund / Kodierung für FE	-	Fahrempfehlung	FAS		LeiDis: Reserven / Verspätungen, andere Zugfahrten	
51	Lok- und Personalwechsel (geplant)	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan	LeiDis / Leitstelle / tagesaktueller Buchfahrplan (TaBuFa)	
54	Störungen	-	Fahrplan	Stellwerk / Leitstelle			

**Tabelle 13: Ungenutzte oder in der Entwicklung befindliche Zusatzinformationen zur Anzeige auf einem FAS**

Die Funktion „Fahrzeit längen / kürzen“ (31) ist eine Vorgabe des Tf. Möchte er einen Zielpunkt, z. B. einen Haltepunkt, früher erreichen, so kann er aktiv in die FE eingreifen und die Funktion „Fahrzeit kürzen“ wählen, um beispielsweise eine Verspätung zu verringern. Die Fahrempfehlung wird dann dementsprechend angepasst. Alternativ kann er die Funktion „Fahrzeit längen“ wählen, um beispielsweise bei einem geringen Fahrgastaufkommen die Haltezeit in einer Station zu verringern. So kann er die gewonnene Zeit nutzen, um energieeffizienter zu fahren. [25]

Weiterhin kann sich der Tf den Grund oder die Kodierung (33) für die FE anzeigen lassen. Hierzu zählen unter anderem das Aufholen der eigenen Verspätung oder die Verspätungen von vorausfahrenden Zügen oder eine anstehende Überholung eines folgenden, aber schnelleren Zuges. Auch geplante Lok- und Personalwechsel (51) sind für das FAS relevant, da an der Betriebsstelle des Wechsels eine längere Haltezeit einzuplanen ist. Beim Personalwechsel wird, bei fahrzeuggebundenen Systemen, außerdem eine Anmeldung des Tf erwartet, um bspw. eine fahrerabhängige Konfiguration der FAS-Software zu hinterlegen. Bei einem Lokwechsel muss die neue Fahrzeugkonfiguration dem FAS übermittelt werden, womit auch Flügelungen und Vereinigungen von Fahrzeugen hinterlegt sind.

Der letzte Punkt in dieser Kategorie sind vorhandene Störungen (54) auf den kommenden Streckenabschnitten, sofern diese einen Einfluss auf den Fahrtverlauf des zu betrachtenden Zuges haben. Ist eine Störung bekannt, kann die Fahrtrajektorie dementsprechend angepasst werden, sodass für die entsprechende Situation der optimalste Fahrtverlauf ausgegeben wird.

Während die in Tabelle 12 und Tabelle 13 aufgelisteten Kenngrößen eine Ausgabe auf dem FAS oder eine Möglichkeit zum Eingriff des Tf in die FE darstellen, sind in nachfolgender Tabelle 14

weitere Kenngrößen gelistet, welche aktuell noch nicht in einem FAS zur Anwendung kommen bzw. aktuell lediglich sich in der Planung befinden.

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
3	Bremskurven	-	Brems-system	Siche-rungstech-nik / Zug	ETCS (> L2) OBU	teilw. Abh. vom Gewicht	Ist-Daten Berech-nung
8	besondere Ladun-gen		Fahrdy-namik	Zug	Leitstelle		
20	Streckenge-schwindigkeit er-laubte / max. (aus ETCS)	km/h	Fahrdy-namik	Infrastruk-tur / Stell-werk / Leit-stelle	Zs 3-Signal / Balisen ETCS (> L2) / Fahrplan	LeiDis (Ist-Wert)	Spurplan / Posi-tion / (eingestellte Fahrstraße)
43	Dispositionsfahr-plan	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan / RUT-K	LeiDis (Ist-Wert)	
49	IST-Wert am Refe-renzpunkt	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle / Zug		LeiDis (Ist-Wert)	Verspätung / Re-serve → Abgleich Posi-tion und Uhrzeit
58	eingestellter Lauf-weg		Fahrweg	Stellwerk	Spurplan	Zuglaufrege-lung (ZLR)	
59	Fahrstraße (eingestellte)	-	Fahrweg	Stellwerk	Spurplan (DaVit)	Fahrweg / -straße	
61	Gleistopologie	-	Infra-struktur		Stellwerk / Spurplan		
63	Lok- und Perso-nalwechsellpunkte	km	Infra-struktur	Leitstelle	Spurplan		
90	Zugmodus	-	Zug	Zug			

**Tabelle 14: Zusätzliche, noch nicht genutzte oder in der Planung befindliche Inputfaktoren**

Werden genaue bzw. aktuelle Bremskurven (3) wie sie z. B. bei ETCS ab Level 2 Anwendung finden und zeitgleich das Zuggewicht berücksichtigt, ist eine exaktere Berechnung der Bremskraft bzw. der benötigten -zeit möglich, was unter anderem der Erhöhung der Leistungsfähigkeit zu-gutekommt. Aus Betrachtung der Fahrdynamik können zusätzlich besondere Ladungen (8) be-rücksichtigt werden, welche ggf. das Beschleunigungs- oder Bremsvermögens beeinflussen. Eben-falls sind die Geschwindigkeitswerte für die aktuell gefahrene (11) und die erlaubte Streckenge-schwindigkeit (20) als maximal mögliche Vorgaben anzudenken.

Aus der Kategorie Fahrplan sind sowohl Anpassungen über Dispositionsentscheidungen (43) dem FAS zur Verfügung zu stellen, als auch gemessene Ist-Werte an einem Referenzpunkt (49) zu nut-zen, um dem eine Aussage über die Einhaltung der FE abzuleiten. Für die Berücksichtigung einer schnelleren Fahrstraßenauflösung aus Kapazitätswegen ist der eingestellte Laufweg bzw. die entsprechende Fahrstraße von Bedeutung, da in Abhängigkeit der Bilde- und Auflösezeiten diese entsprechend kurzfristiger eingestellt bzw. früher aufgelöst werden können. Die Gleistopologie kann um die möglichen zur Verfügung stehenden Fahrstraßen ergänzt werden, um die notwen-digen Informationen zu erhalten (58 und 59). Die möglichen Fahrwege werden in der Regel bei der Einmessung der Infrastrukturdaten erfasst

Wie in Tabelle 13 dargestellt, ermöglicht die Kenntnis über bevorstehende die Personal- und Lok-wechsel einen optimierten Betriebsprozess, dafür wird jedoch zusätzlich der Ort (63) an dem diese Wechsel durchgeführt werden sollen benötigt.

Über das sich in der Ausrüstung befindende Zugsicherungssystem ETCS konnten ebenfalls weitere Inputgrößen für die Erweiterung von FAS identifiziert werden, welche in Tabelle 14 dargestellt sind. ETCS bietet die Möglichkeit diese Informationen in einem gemeinsamen Protokoll zur Verfügung zu stellen.

Nachdem die Datengrundlage erörtert wurde, werden im Folgenden Funktionen für vFAS erläutert und den Optimierungsstufen aus Abbildung 1 zugeordnet. Weiterhin erfolgen eine Zuordnung zu den bisherigen Eingangsdaten und eine anschließende Bewertung.

### 3.2. Verbesserung bestehender und zusätzlicher Funktionen von FAS

Wie in Abschnitt 2.1 bereits beschrieben wurde, haben einfache FAS zunächst das Ziel eine energiesparende Fahrweise unter Einhaltung des hinterlegten Fahrplans zu ermitteln, so dass Verspätungen vermieden bzw. wieder aufgeholt werden können und dennoch umweltbewusst zu fahren. Durch die analysierten Datengrundlagen können sowohl für bestehende Systeme, als auch im Sinne einer Vernetzung, neue Funktionen identifiziert werden, welche den Einsatz eines FAS effizienter machen. Die folgende Tabelle 15 zeigt diese möglichen Funktionen von FAS als auch von vFAS, welche jeweils einem übergeordneten Optimierungsziel zugeordnet sind.

Optimierungsziel	Funktionen einer vernetzten Fahrerassistenz
Energieeinsparung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aufwertung von Signalbegriffen / Halt vermeiden</li> <li>▪ Position &amp; Geschwindigkeiten anderer Züge</li> <li>▪ Fahrstraßenbelegungen / -auflösungen</li> <li>▪ Beharrungsfahrt („mittlere“ Geschwindigkeit)</li> <li>▪ Ausrollen möglich</li> </ul>
Abbau & Vermeidung von Verspätungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fahrgastwechsel / -aufkommen / Besetzung der Züge</li> <li>▪ Pufferzeiten ausnutzen</li> <li>▪ Optimierung von Überholvorgängen</li> <li>▪ Summe der Verspätung über beteiligte Züge verringern</li> <li>▪ Wetterlage berücksichtigen Pönalen vermeiden</li> </ul>
Leistungsfähigkeiten	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ vgl. Energieeinsparung</li> <li>▪ Relevant für: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zugkreuzung</li> <li>▪ Optimierung von Überholvorgängen</li> <li>▪ Vermeidung von unnötigen Halten</li> <li>▪ Optimale Ausnutzung von Fahrstraßen</li> </ul> </li> </ul>
Vermeidung von elektrischen Lastspitzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ gezieltes Anfahren (schwächeres Anfahren)</li> <li>▪ Zeitlicher Versatz des Anfahrens (Staffelung)</li> <li>▪ Rekuperation</li> </ul>
Verschleißarmes Fahren	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ unnötiges Bremsen vermeiden</li> <li>▪ effizienteres (langsames) Anfahren</li> <li>▪ Wetterlage berücksichtigen</li> <li>▪ Nutzen der elektrischen Bremse</li> </ul>
Akzeptanz bei TF	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ weiterführende Informationen</li> <li>▪ Begründungen für Fahrempfehlung</li> <li>▪ optional Durchschnittlicher Verbrauch Pünktlichkeit vs. Energieverbrauch</li> </ul>
Fahrgastinformation	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ggf. exakte Information Ankunft am nächsten Bahnhof</li> </ul>

**Tabelle 15: Optimierungsziele und Funktionen von vFAS**

Die in Tabelle 15 dargestellten Funktionen werden je Optimierungsziel im Nachgang in den Unterabschnitten 3.2.1 bis 3.2.7 noch einmal detailliert beschrieben und mit den benötigten Eingangsgrößen abgeglichen.



### 3.2.1. Erhöhung der Energieeinsparung

Die Erhöhung der Energieeinsparung kann durch neue Funktionalitäten bereits ab Stufe 1 der Optimierung erfolgen, d. h. auch für ein einzelnes Fahrzeug können im Zuge einer Vernetzung zusätzliche Informationen den Energieverbrauch weiter senken. Diese Funktionalitäten können wie folgt zusammengefasst werden:

- Aufwertung von Signalbegriffen / Halt vermeiden
- Position & Geschwindigkeiten anderer Züge
- Fahrstraßenbelegungen / -auflösungen
- Beharrungsfahrt / „mittlere“ Geschwindigkeit
- Ausrollen möglich

Durch eine Erweiterung der streckenseitigen Datengrundlage in Form einer Berücksichtigung von Signalbegriffen (65) bzw. deren Prognosen, können ungeplante Halte vermieden werden (vgl. Abschnitt 2.2, Abbildung 5). Sollte sich ein Halt nicht vermeiden lassen so kann diese Information, solange sie frühzeitig vorliegt, dennoch zu einer Energieeinsparung führen, indem bereits vor dem haltzeigenden Signal die Traktionskraft abgeschaltet (28) oder die Geschwindigkeit durch elektrisches Bremsen vermindert wird. Weiterhin ist durch die Kenntnis der Signalbegriffe eine optimierte Fahrweise des Zuges unter Betrachtung des aktuellen Betriebsgeschehens möglich. Die Optimierung erfolgt dann nicht nur zwischen zwei aufeinanderfolgenden Halten, sondern zusätzlich an den Durchfahrtpunkten der Signale. Für diese werden die energetisch optimale Geschwindigkeit sowie die energetisch optimale Durchfahrtszeit bestimmt. Realisiert werden diese Fahrweisen durch die Empfehlung von Auslaufregimen (28) oder Beharrungsfahrten.

Generell lässt sich festhalten, dass im Falle fehlender Informationen zu den Signalbegriffen diese mit dem Wissen der Positionen und Geschwindigkeiten von weiteren Zügen auf dem Streckenabschnitt geschätzt werden können, wofür u. a. Big Data Analysen denkbar sind. So kann ebenfalls ein optimierter Fahrtverlauf bis zum und nach dem Signal ermittelt werden. Die Position und die Geschwindigkeit des folgenden Zuges können zusätzlich in die Optimierung einfließen, sodass diesem im Sinne einer Gesamtoptimierung möglichst kein Nachteil entsteht.

Sonderfall ist die Kenntnis der Position (und Geschwindigkeit) eines kreuzenden Zuges auf eingleisigen Strecken (vgl. Abschnitt 2.2, Abbildung 6). Trifft dieser verspätet ein, kann der betrachtete Zug bereits vorausschauend seine Fahrzeit verlängern und damit Energie sparen, statt die Wartezeit am Kreuzungsbahnhof zu verbringen. Dies kann bereits für mehrere Halte vor dem Kreuzungspunkt geschehen, sofern die vorhandenen Fahrplanreserven dies zulassen. Keinesfalls sollte dies zu Ungunsten der Fahrgäste geschehen, sondern im Bereich von Sekunden, die für den Fahrgast kaum merklich sind. Weiterhin muss topographisch und betrieblich sichergestellt sein, dass der Ort der Zugkreuzung nicht verschiebbar ist.

Die Anschlussgewährung bspw. an zentralen Umsteigeorten ist ähnlich handhabbar. Ist ein Anschlusszug verspätet, können die anderen Fahrzeuge ebenfalls ihre Fahrzeit im Zulauf auf den Umsteigebahnhof innerhalb gewisser Grenzen verlängern und die dadurch zusätzlich zur Verfügung stehende Fahrzeitreserve zum Energiesparen nutzen.

Die Kenntnis der Belegung und Auflösung von Fahrstraßen birgt weiteres Potenzial, da in diesem Fall die Optimierung noch eher stattfinden kann. Je höher der zeitliche Vorlauf bzw. die Vorausschau desto größer sind der Optimierungshorizont und somit die Energieeinsparung.

Bei der Analyse der Inputdaten ist ersichtlich, dass sich neben neuen Funktionen auch eine Verbesserung der bereits vorhandenen Funktionen ergibt. So können Beharrungsfahrten (Tempomat-Empfehlungen) und Ausrollregime (28) noch genauer ermittelt werden, indem bspw. Position (72) und Geschwindigkeit (11) vom Fahrzeug, statt aus dem GPS-Modul, bezogen werden. Weiterhin sind unter Beachtung von Zug- und Energieverbrauchsdaten (77 bzw. 81) neue Gütekriterien möglich. Während der einfache Ansatz auf eine Minimierung des (berechneten) Traktionsenergieverbrauchs (22) abzielt, können nun der Gesamtenergieverbrauch, bestehend aus Traktion, Nebenverbraucher und Hilfsbetriebe, oder die Energiebilanz (aufgenommene abzüglich rückgespeicherter Energie bei elektrischer Traktion) minimiert werden. Entsprechend werden Auslauf- und Tempomat-Empfehlung hinsichtlich individueller Gütekriterien ermittelt. Den soeben beschriebenen Funktionen für die Erreichung des Optimierungsziels der energiesparenden Fahrweise werden die in Tabelle 16 dargestellten Kenngrößen benötigt. Die Kenngrößen sind absteigend nach der Anzahl Funktionen sortiert, für die sie benötigt werden. Die Zugposition (Streckenkilometer oder Geo-Koordinate) ist dabei die einzige Eingangsgröße, die für alle sechs Funktionen benötigt wird. Weiterhin werden die bisher ungenutzten Parameter in Tabelle 16 fett hervorgehoben.

ID	Kenngröße	Aufwertung von Signalbegriffen/ Halt vermeiden	Position & Geschwindigkeit vorausfahrender / folgender / kreuzender Züge	Fahrstraßenbelegungen/ -auflösungen	Beharrungsfahrt	Information Ausrollen möglich	Stillstandszeiten / Systeme in Stand-by / Anwohner schonen
74	Zugposition	X	X	X	X	X	X
<b>3</b>	<b>Bremskurven</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
11	Fahrgeschwindigkeit (aktuell)	X	X	X	X	X	
13	Fahrwiderstände Zug	X	X	X	X	X	
14	Gewicht Zug (netto)	X	X	X	X	X	
19	Neigungswiderstand	X	X	X	X	X	
<b>20</b>	<b>Strecke erlaubte / max. (aus ETCS)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
28	Ausrollen	X	X	X	X	X	
<b>31</b>	<b>Fahrzeit Längen / Kürzen</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
32	Geschwindigkeit; delta	X	X	X	X	X	
<b>33</b>	<b>Grund / Kodierung für FE</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
38	Zeitstempel Versand der Nachricht	X	X	X	X	X	
44	Durchfahrzeit (früheste)	X	X	X	X	X	
45	Durchfahrzeit (späteste)	X	X	X	X	X	
50	Langsamfahrstellen	X	X	X	X	X	
62	Höhenprofil / Neigungswechsel	X	X	X	X	X	
64	Neigung	X	X	X	X	X	
<b>65</b>	<b>Signalbild</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
69	Entfernung zum nächsten Referenzpunkt	X	X	X	X	X	
75	Zugposition Entfernung zu einem vorausfahrenden Zug	X	X	X	X	X	



88	Ist-Zeit System	X	X	X	X	X	
6	Anfahrzugkraft (max.)	X	X	X	X		
7	Beschleunigungsvermögen	X	X	X	X		
10	Bremsvermögen	X	X	X		X	
12	Fahrgeschwindigkeit (maximal, Zug)	X	X	X	X		
18	Motorleistung (max, aktuell, Korrektur)	X	X	X			X
<b>54</b>	<b>Störungen</b>		<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
70	Örtl. Referenzpunkt; Ende	X	X	X	X		
71	Örtl. Referenzpunkt; Start	X	X	X	X		
72	Position / Streckenkilometer	X	X	X	X		
1	Bremsgewicht	X	X	X			
2	Bremshundertstel	X	X	X			
4	Bremsstellung	X	X	X			
5	Bremssystem des Zuges	X	X	X			
9	Bogenwiderstand		X		X	X	
16	Massefaktor	X	X	X			
21	Traktionsleistung; maximum	X	X	X			
24	Zugkraft	X	X	X			
37	zeitl. Gültigkeit (Start / Ende)		X		X	X	
41	Blockbelegungszeiten (Ist-Wert)	X	X	X			
<b>49</b>	<b>IST-Wert am Referenzpunkt</b>	<b>X</b>		<b>X</b>	<b>X</b>		
52	Reserve bis zum nächsten Referenzpunkt			X	X	X	
<b>59</b>	<b>Fahrstraße (eingestellte)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>			
66	Signalposition	X	X	X			
67	Streckenkilometrierung	X	X	X			
89	Zuglängen	X	X	X			
34	Korridor Durchfahrtszeit Fall: FAS-O				X	X	
77	Energie / Kraftstoff (aktueller)				X	X	
17	Motor-Drehzahl (max, aktuell, Korrektur)						X
<b>25</b>	<b>Zuladung des Zuges / Besetzungsgrad / beförderte Fahrgäste</b>			<b>X</b>			
<b>35</b>	<b>Leerlauf vermeiden</b>						<b>X</b>
40	Ankunftszeit Bahnhof					X	
56	Verspätung vorausfahrender Züge		X				
<b>58</b>	<b>eingestellter Laufweg</b>			<b>X</b>			
68	Entfernung zum letzten Referenzpunkt		X				
80	Leerlauf						X
81	Nebenverbräuche						X
84	Tankdaten						X
absteigend nach Anzahl Funktionen; bisher ungenutzte Kenngrößen sind in fett dargestellt							

Tabelle 16: Für die Optimierungsziele der Energieeinsparung notwendige Inputwerte

Bei der Analyse der Tabelle 16 wird ersichtlich, dass von den insgesamt 91 identifizierten Kenngrößen (vgl. Anhang), 58 Kenngrößen auf die Senkung des Energiebedarfs einzahlen. Die Kenngrößen, welche für fünf der in diesem Kapitel beschriebenen Funktionen von vFAS relevant sind, sind der Fahrdynamik, den Fahrempfehlungen oder der Infrastruktur zuzuordnen. Dabei benötigen die Funktionen der Signalaufwertung, die Position von weiteren Zügen im Netz sowie die Fahrstraßenbelegung die meisten Eingangsgrößen und sind somit verhältnismäßig aufwendig umzusetzen. Für die bisher ungenutzten Eingangsgrößen ist jedoch ersichtlich, dass diese für die Verbesserung der Energieeinsparung größtenteils für drei bis fünf Funktionen relevant sind und daher schon eine Implementierung für die Erhöhung der Energieeinsparung lohnenswert ist.

### 3.2.2. Abbau und Vermeidung von Verspätungen

Weiterhin bringen die neuen Funktionen durch zusätzliche Daten mit dem Ziel der Energieeinsparung in vielen Fällen eine Erhöhung der Pünktlichkeit mit sich. Zu den benötigten Funktionen des Verspätungsabbaus bzw. der Vermeidung gehören:

- Fahrgastwechsel / -aufkommen / Besetzung der Züge
- Pufferzeiten ausnutzen
- Optimierung von Überholvorgängen
- Summe der Verspätung über beteiligte Züge verringern
- Wetterlage berücksichtigen Pönalen vermeiden

Die Erstellung des energieoptimalen Fahrplans in Echtzeit (vgl. Dynamische Fahrzeitenregelung) kann mit zusätzlichen Daten angereichert werden. Die bisher stattfindende Prognose von Fahrgastwechselzeiten kann durch zusätzliche Daten bspw. zur Besetzung der Fahrgäste in den Zügen verfeinert werden, was sich nicht nur energetisch, sondern auch zeitlich günstiger auf die Fahrt auswirkt, sodass die Pünktlichkeit erhöht wird. Die optimale Ausnutzung von Pufferzeiten wird ebenfalls durch vFAS ermöglicht, da hingegen der ursprünglichen Sichtweis die Fahrzeitreserve nicht zwischen zwei Halten, sondern zwischen benachbarten Signalen innerhalb eines Blockabschnitts optimal verteilt werden kann.

Werden bspw. Überholvorgänge optimiert oder unnötige Halte vermieden, entfallen zusätzliche Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, was die Fahrzeit verkürzt. Je nach Optimierungsziel bzw. Gütekriterium gilt dies aber nicht für jedes einzelne Fahrzeug, sondern auch für alle Fahrzeuge eines Betreibers (Stufe 2) bzw. alle Fahrzeuge in einem Netzbereich (Stufe 3). Bei der Minimierung der Summe der Verspätungen zu Gunsten des Erreichens eines Gesamtoptimums kann bspw. die Verspätung einzelner Züge gleichbleiben oder gar minimal erhöht werden.

Mittels Hinzunahme von Wetterdaten lassen sich insbesondere längere Bremswege prognostizieren, was im FAS geschieht und eine angepasste Fahrempfehlung zur Folge hat, die den Verspätungsabbau unterstützt.

Für den Verspätungsabbau sind folgende bereits genutzten und genutzten (fett hervorgehoben) Kenngrößen relevant (vgl. Tabelle 17).

Für die Berücksichtigung der Funktion des Verspätungsabbaus werden in Summe 30 Kenngrößen als relevant eingestuft, von denen jedoch nur drei Kenngrößen zu den neu identifizierten Größen gehören. Am relevantesten ist die direkte Verwendung der Verspätung (55), welche für drei von vier Funktionen relevant ist. Alternativ kann diese Information auch über die aktuelle Fahrplanlage

und dem Abgleich der Position des Zuges ermittelt werden. Ein Vorteil bietet hier für den einzelnen Zug der genauere Wert der Positionierung.

Die Zuladung des Zuges (25) und das Fahrgastwechselaufkommen (29) sind dem Leitsystem prinzipiell bekannt und können über die Vernetzung auch in das FAS eingespielt werden, um beispielsweise Umsteigebeziehungen und damit eine Anschlusssicherung zu gewährleisten.

Eine Besonderheit stellt die Fahrgeschwindigkeit (11) dar, welche jedoch nicht zu den neuen Kenngrößen gehört. Neu ist hierbei, dass diese in den Überlegungen direkt vom Fahrzeug abgegriffen wird, wodurch genauere Fahrempfehlungen erzielt werden können. Allerdings ist für diesen Abgriff ein Eingriff in die Fahrzeugtechnik notwendig, weshalb viele der herkömmlichen Systeme auf das fahrzeugunabhängige GPS zurückgreifen.

ID	Kenngröße	Fahrgastwechsel / -aufkommen / Besetzung der Züge	Pufferzeiten ausnutzen	Summe der Verspätung über beteiligte Züge verringern	Wetterlage berücksichtigen ggf. kürzere Bremswege
11	Fahrgeschwindigkeit (aktuell)		X	X	X
39	Abfahrtszeit Bahnhof	X	X	X	
40	Ankunftszeit Bahnhof	X	X	X	
55	<b>Verspätung</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
56	Verspätung vorausfahrender Züge	X	X	X	
12	Fahrgeschwindigkeit (maximal, Zug)		X	X	
14	Gewicht Zug (netto)	X		X	
25	<b>Zuladung des Zuges / Besetzungsgrad / beförderte Fahrgäste</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		
29	<b>Fahrgastwechselaufkommen</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		
34	Korridor Durchfahrtszeit Fall: DAS-O		X	X	
52	Reserve bis zum nächsten Referenzpunkt		X	X	
3	Bremskurven				X
5	Bremssystem des Zuges				X
7	Beschleunigungsvermögen		X		
10	Bremsvermögen		X		
26	Art des Ereignisses		X		
28	Ausrollen		X		
31	Fahrzeit Längen / Kürzen			X	
45	Durchfahrzeit (späteste)		X		
46	Haltezeit / Anpassung (Ist)	X			
47	Haltezeit / Mindesthaltezeit	X			
48	Haltezeit / Regelhaltezeit (Soll)	X			
50	Langsamfahrstellen			X	

62	Höhenprofil / Neigungswechsel			X	
74	Zugposition			X	
75	Zugposition Entfernung zu einem vorrausfahrenden Zug			X	
85	Position Messstation				X
86	Stündl. Temperaturwerte				X
87	Wettereinflüsse				X
88	Ist-Zeit System				X
absteigend nach Anzahl Funktionen; bisher ungenutzte Kenngrößen sind in fett dargestellt					

**Tabelle 17: Für die Optimierungsziele des Verspätungsabbaus notwendige Inputwerte**

### 3.2.3. Erhöhung der Leistungsfähigkeit

Für eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit, überwiegend auf Streckenabschnitten werden ebenfalls weitere Funktionen innerhalb von FAS benötigt und setzen überwiegend ein vorausschauendes Fahren voraus, welches bereits in Unterabschnitt 3.2.1 beschrieben wurde. Die Verbesserung von Streckenleistungsfähigkeiten ist jedoch maßgeblich relevant für die nachfolgenden betrieblichen Situationen:

- Zugkreuzung
- Optimierung von Überholvorgängen
- Vermeidung von unnötigen Halten
- Optimale Ausnutzung von Fahrstraßen

Ein vorausschauendes Fahren unter Berücksichtigung anderer Zugfahrten ist ab Stufe 2 möglich und angedacht. Als einfaches Beispiel sei die Zugkreuzung auf eingleisiger Strecke genannt (vgl. Abbildung 6). Ist der Gegenzug verspätet, kann der betroffene Zug unter Berücksichtigung anderer etwaiger Anschlüsse (auch zu anderen Verkehrsträgern) die Fahrzeit verlängern und ebenfalls etwas später am Halt eintreffen, was eine weitere Energieeinsparung (vgl. Unterabschnitt 3.2.1) mit sich bringt. Vom Gegenzug müssen lediglich genaue Prognose-Ankunftszeiten übermittelt werden. Dies erfolgt durch einen Positions- (75), Geschwindigkeits- (32) und Fahrplanabgleich. Üblicherweise wird zusätzlich eine Pufferzeit eingebaut, falls der Gegenzug die Verspätung aufholen kann. Je eher die Verspätung bekannt ist, desto eher kann die zusätzliche Fahrzeit des betrachteten Fahrzeugs genutzt werden, d. h. die Fahrplanübersteuerung ist nicht nur am Kreuzungs-Halt anwendbar, sondern bereits an den Halten davor.

Die Funktionen Optimierung von Überholvorgängen, Vermeidung unnötiger Halte und optimale Nutzung der Fahrstraße wurden in Abschnitt 2.2 detailliert betrachtet.

ID	Kenngroße	Zugkreuzung	Optimierung von Überholvorgängen	Vermeidung von unnötigen Halten	Fahrstraßen optimal ausnutzen
<b>3</b>	<b>Bremskurven</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
7	Beschleunigungsvermögen	X	X	X	X
10	Bremsvermögen	X	X	X	X
11	Fahrgeschwindigkeit (aktuell)	X	X	X	X
12	Fahrgeschwindigkeit (maximal, Zug)	X	X	X	X
13	Fahrwiderstände Zug	X	X	X	X
14	Gewicht Zug (netto)	X	X	X	X
19	Neigungswiderstand	X	X	X	X
<b>20</b>	<b>Strecke erlaubte / max. (aus ETCS)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
23	Widerstände Wagenpark	X	X	X	X
24	Zugkraft	X	X	X	X
30	Fahrgeschwindigkeit (optimal) Fall: DAS-C	X	X	X	X
32	Geschwindigkeit; delta	X	X	X	X
34	Korridor Durchfahrtszeit Fall: FAS-O	X	X	X	X
38	Zeitstempel Versand der Nachricht	X	X	X	X
44	Durchfahrzeit (früheste)	X	X	X	X
45	Durchfahrzeit (späteste)	X	X	X	X
50	Langsamfahrstellen	X	X	X	X
62	Höhenprofil / Neigungswechsel	X	X	X	X
<b>65</b>	<b>Signalbild</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
66	Signalposition	X	X	X	X
69	Entfernung zum nächsten Referenzpunkt	X	X	X	X
74	Zugposition	X	X	X	X
28	Ausrollen		X	X	X
41	Blockbelegungszeiten (Ist-Wert)		X	X	X
72	Position / Streckenkilometer	X	X	X	
75	Zugposition Entfernung zu einem vorausfahrenden Zug	X	X	X	
1	Bremsgewicht		X	X	
2	Bremshundertstel		X	X	
4	Bremsstellung		X	X	
6	Anfahrzugkraft (max.)		X	X	
9	Bogenwiderstand		X	X	
16	Massefaktor		X	X	
21	Traktionsleistung; maximum		X	X	
<b>25</b>	<b>Zuladung des Zuges / Besetzungsgrad / beförderte Fahrgäste</b>		<b>X</b>	<b>X</b>	
<b>31</b>	<b>Fahrzeit Längen / Kürzen</b>		<b>X</b>	<b>X</b>	
<b>33</b>	<b>Grund / Kodierung für FE</b>		<b>X</b>	<b>X</b>	

37	zeitl. Gültigkeit (Start / Ende)		X	X	
<b>49</b>	<b>IST-Wert am Referenzpunkt</b>		<b>X</b>	<b>X</b>	
<b>58</b>	<b>eingestellter Laufweg</b>			<b>X</b>	<b>X</b>
64	Neigung		X	X	
67	Streckenkilometrierung		X	X	
70	Örtl. Referenzpunkt; Ende		X	X	
71	Örtl. Referenzpunkt; Start		X	X	
89	Zuglänge	X	X		
18	Motorleistung (max, aktuell, Korrektur)			X	
39	Abfahrtszeit Bahnhof	X			
40	Ankunftszeit Bahnhof	X			
42	Blockbelegungszeiten (Soll-Wert)		X		
<b>55</b>	<b>Verspätung</b>	<b>X</b>			
56	Verspätung vorausfahrender Züge	X			
<b>59</b>	<b>Fahrstraße (eingestellte)</b>				<b>X</b>
60	Bahnsteig und Haltepositionen		X		
<b>61</b>	<b>Gleistopologie</b>	<b>X</b>			
68	Entfernung zum letzten Referenzpunkt		X		
absteigend nach Anzahl Funktionen; bisher ungenutzte Kenngrößen sind in fett dargestellt					

**Tabelle 18: Für die Optimierungsziele der Streckenleistungsfähigkeit notwendige Inputwerte**

Die in Tabelle 18 vorgestellten Funktionen und Eingangsgrößen zeigen, dass in Summe 55 Faktoren einen Einfluss auf die Verbesserung der Leistungsfähigkeit bieten. Zudem sind zehn Faktoren derzeit noch ungenutzt. Hier zeigt sich, dass von diesen ungenutzten Faktoren drei benötigt werden, um alle vier Funktionen zu bedienen. Diese sind die genauere Berücksichtigung der Bremskurven (3), die erlaubte Streckengeschwindigkeit aus ETCS (20) und das Signalbild (65). Hier wird auch ersichtlich, dass diese Funktionen bereits in Tabelle 16 für die Verbesserung der Energiebedarfe Verwendung finden können.

### 3.2.4. Vermeidung von elektrischen Lastspitzen

Die Betrachtung mehrerer Fahrzeuge in elektrischen Verkehrssystemen ermöglicht die Optimierung des Gesamtenergieverbrauchs, auch wenn dies für das einzelne Fahrzeug eine Erhöhung des Energiebezugs bedeuten kann. Zielführend sind eine flottenweite Verteilung der Energieaufnahme und Rückspeisevorgänge, sodass Lastspitzen vermieden werden, was sich wiederum in Energiekosten widerspiegelt. Die Beeinflussung der Fahrweise für FAS kann für dieses Optimierungsziel im Einzelnen bedeuten:

- Anfahren mit verminderter Zugkraft (im Gegensatz zum „straffen“ Anfahren in Stufe 1) zur Entzerrung der Energieaufnahme und gezielte Verteilung dieser auf unterschiedliche Zeitfenster,
- Anfahren bei gleichzeitiger Bremsung eines anderen Fahrzeugs in der Nähe; somit kann die beim Bremsen rückgespeiste Energie direkt genutzt werden, anstatt verlustbehaftet ins Netz zurückgespeist zu werden.
- Beharrung bei einer Geschwindigkeit unterhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit statt Auslauf mit dem Ziel der gleichmäßigeren Verteilung der Energieaufnahme,

- Vermeidung von erneutem Beschleunigen nach Abbremsen am Signal,
- Haltezeitverlängerung (ggf. Toleranz einer geringen Verspätung zu Gunsten der Vermeidung der Lastspitze).

Bei derartigen Optimierungszielen ist zu beachten, dass diese eine mikroskopische Modellierung der Fahrt voraussetzen, d. h. sowohl Strecken- als auch Fahrzeugparameter müssen hinreichend genau bekannt sein, um für ausgewählte Fahrweisen (Beschleunigung mit maximaler und verminderter Zugkraft, Beharrungsfahrt bei einer bestimmten Geschwindigkeit, Auslauf, Bremsung usw.) eine genaue Prognose des Energiebedarfs bestimmen zu können. Weiterhin sollten die landseitig ermittelten Fahrempfehlungen für die einzelnen Fahrzeuge möglichst ohne zeitlichen Verzug empfangen werden.

Die Vermeidung von Lastspitzen ist nicht nur technisch günstiger, sondern spiegelt sich auch in wirtschaftlichen Aspekten wider: Die Energiekosten orientieren sich üblicherweise am höchsten auftretenden Viertelstundenwert im Monat oder sogar im Jahr. Wird der vereinbarte Wert bei mindestens einer Viertelstunde im Zeitraum überschritten, sind Nachzahlungen notwendig. Daher besteht auch ein wirtschaftliches Interesse daran, elektrische Lastspitzen zu vermeiden.

Weitere Gründe können die Begrenzung der elektrischen Leistung auf bestimmten Streckenabschnitten bspw. durch den Infrastrukturbetreiber oder die gezielte Vermeidung der Rekuperation zur Sicherstellung eines stabilen Stromnetzes sein.

Für die Vermeidung von elektrischen Lastspitzen sind die folgenden Kenngrößen von besonderem Interesse.

ID	Kenngröße	gezieltes Anfahren	Zeitlicher Versatz des Anfahrens	Rekuperation
38	Zeitstempel Versand der Nachricht	X	X	X
<b>3</b>	<b>Bremskurven</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
11	Fahrgeschwindigkeit (aktuell)	X	X	X
13	Fahrwiderstände Zug	X	X	X
14	Gewicht Zug (netto)	X	X	X
19	Neigungswiderstand	X	X	X
<b>20</b>	<b>Strecke erlaubte / max. (aus ETCS)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>33</b>	<b>Grund / Kodierung für FE</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
50	Langsamfahrstellen	X	X	X
<b>55</b>	<b>Verspätung</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
62	Höhenprofil / Neigungswechsel	X	X	X
64	Neigung	X	X	X
74	Zugposition	X	X	X
77	Energie / Kraftstoff (aktueller)	X	X	X
88	Ist-Zeit System	X	X	X
6	Anfahrzugkraft (max.)	X	X	

7	Beschleunigungsvermögen	X	X	
12	Fahrgeschwindigkeit (maximal, Zug)	X	X	
16	Massefaktor	X	X	
17	Motor-Drehzahl (max, aktuell, Korrektur)	X	X	
18	Motorleistung (max, aktuell, Korrektur)	X	X	
21	Traktionsleistung; maximum	X	X	
22	Traktionsleistungsbedarf	X	X	
24	Zugkraft	X	X	
<b>25</b>	<b>Zuladung des Zuges / Besetzungsgrad / beförderte Fahrgäste</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
39	Abfahrtszeit Bahnhof	X	X	
78	Energie / Kraftstoff (spezifischer)	X	X	
79	Energie / Kraftstoff (wegbezogen)	X	X	
4	Bremsstellung			X
5	Bremssystem des Zuges			X
<b>8</b>	<b>besondere Ladungen</b>			<b>X</b>
15	Lastverteilung	X		
28	Ausrollen			X
40	Ankunftszeit Bahnhof			X
<b>49</b>	<b>IST-Wert am Referenzpunkt</b>			<b>X</b>
81	Nebenverbräuche	X		
82	Rekuperation (maximal)			X
83	Rückspeisquote			X
absteigend nach Anzahl Funktionen; bisher ungenutzte Kenngrößen sind in fett dargestellt				

**Tabelle 19: Für die Optimierungsziele der Vermeidung von Lastspitzen notwendige Inputwerte**

Auch bei der Vermeidung der Lastspitzen kommen bereits 31 der identifizierten Kenngrößen bereits in FAS zur Anwendung. Weitere sieben Kenngrößen können das Optimierungsziel noch verbessern, so dass insgesamt 38 Eingangsgrößen als relevant eingestuft wurden.

### 3.2.5. Verschleißarmes Fahren

Für das verschleißarme Fahren wurden drei Funktionen gefunden.

- unnötiges Bremsen vermeiden
- effizienteres (langsames) Anfahren
- Nutzen der elektrischen Bremse

Durch das Vermeiden von unnötigen Bremsvorgängen lässt sich vor allem im Dieselverkehr die Abnutzung der mechanischen Bremse reduzieren. Durch die Harmonisierung der Geschwindigkeiten mehrerer Fahrzeuge ist dies bei vFAS umsetzbar, aber auch beim klassischen FAS findet dies bereits Anwendung, indem nicht länger als notwendig beschleunigt wird und die Zielbremsung vor dem nächsten Halt bereits mit geringerer Bremseneinsatzgeschwindigkeit erfolgt.

Das optimale Beschleunigen zielt auf ein sanfteres Anfahren ab, durch das die Motoren geschont werden können. Mögliche Fahrempfehlungen sind bspw. das „Anfahren mit verminderter Zugkraft“, sodass ein Übersteuern insbesondere bei nasser Schiene vermieden wird.



Ist eine Bremsung unvermeidbar sollte diese, solange die Fahrzeitreserve und das Zugsicherungssystem es zulassen, möglichst rein elektrisch erfolgen, um die Abnutzung der mechanischen Bremse zu verringern und möglichst viel Energie in das Netz zurück zu speisen.

ID	Kenngroße	unnötiges Bremsen vermeiden	Nutzung der elektrischen Bremse	effizienteres Anfahren
<b>3</b>	<b>Bremskurven</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
11	Fahrgeschwindigkeit (aktuell)	X	X	X
12	Fahrgeschwindigkeit (maximal, Zug)	X	X	X
13	Fahrwiderstände Zug	X	X	X
14	Gewicht Zug (netto)	X	X	X
16	Massefaktor	X	X	X
19	Neigungswiderstand	X	X	X
<b>20</b>	<b>Strecke erlaubte / max. (aus ETCS)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>33</b>	<b>Grund / Kodierung für Fahrempfehlung</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
38	Zeitstempel Versand der Nachricht	X	X	X
50	Langsamfahrstellen	X	X	X
<b>55</b>	<b>Verspätung</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
62	Höhenprofil / Neigungswechsel	X	X	X
64	Neigung	X	X	X
74	Zugposition	X	X	X
88	Ist-Zeit System	X	X	X
1	Bremsgewicht	X	X	
2	Bremshundertstel	X	X	
4	Bremsstellung	X	X	
5	Bremssystem des Zuges	X	X	
<b>8</b>	<b>besondere Ladungen</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
28	Ausrollen	X	X	
39	Abfahrtszeit Bahnhof	X	X	
40	Ankunftszeit Bahnhof	X	X	
<b>49</b>	<b>IST-Wert am Referenzpunkt</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
<b>63</b>	<b>Lok- und Personalwechsellpunkte</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
6	Anfahrzugkraft (max.)			X
7	Beschleunigungsvermögen			X
15	Lastverteilung			X
17	Motor-Drehzahl (max, aktuell, Korrektur)			X
18	Motorleistung (max, aktuell, Korrektur)			X
21	Traktionsleistung; maximum			X
22	Traktionsleistungsbedarf			X

23	Widerstände Wagenpark			X
24	Zugkraft			X
<b>25</b>	<b>Zuladung des Zuges / Besetzungsgrad / beförderte Fahrgäste</b>			<b>X</b>
60	Bahnsteig und Haltepositionen	X		
<b>65</b>	<b>Signalbild</b>	<b>X</b>		
77	Energie / Kraftstoff (aktueller)			X
78	Energie / Kraftstoff (spezifischer)			X
79	Energie / Kraftstoff (wegbezogen)			X
absteigend nach Anzahl Funktionen; bisher ungenutzte Kenngrößen sind in fett dargestellt				

**Tabelle 20: Für die Optimierungsziele der Verschleißreduktion notwendige Inputwerte**

Bei der Verschleißreduktion sind es 42 relevante Kenngrößen. Von diesen finden bereits acht in FAS Anwendung.

### 3.2.6. Sicherstellung und Steigerung der Akzeptanz des Systems bei den Triebfahrzeugführern

Je mehr Daten im FAS verarbeitet werden, die dem Tf unter Umständen nicht bekannt sind, desto relevanter ist die Sicherstellung der Akzeptanz. Bei einfachen FAS-Funktionen können alle Aspekte innerhalb von Tf-Schulungen übermittelt werden, jedoch ist dies bei vernetzten FAS mit erweiterter Datengrundlage kaum mehr möglich. Grundsätzlich sollte daher sichergestellt werden, dass für die jeweilige Fahrempfehlung eine ausreichende Begründung möglich ist, so dass die Nachvollziehbarkeit gewährleistet ist. Weiterhin ist eine Begründung nach welchen Kriterien jeweils optimiert wird sinnvoll. Allerdings führen zu viele Informationen zur Ablenkung des Tf, sodass diese Schnittstelle gewissenhaft erarbeitet werden sollte. Speziell Informationen, die für den Tf nicht plausibel sind, wie bspw. Fahren unter der Höchstgeschwindigkeit, obwohl der Zug Verspätung hat, sollten begründet werden.

Die optionale Funktion der Ausweisung des durchschnittlichen Verbrauchs oder die Auswertung des Vergleichs zwischen dem aktuellen Energieverbrauch zur Pünktlichkeit beinhaltet als Referenzwerte die Möglichkeit unmittelbar beim Tf einen Anreiz zu schaffen und seine eigene Fahrweise zu reflektieren.

Auch für die Erhöhung der Akzeptanz bei den Triebfahrzeugführern wurden über die Gespräche mit selbigen neue Kenngrößen identifiziert, welche sich in Tabelle 21 hervorgehoben wurden. Dabei ist maßgeblich die Information über den Grund für die Fahrempfehlung (33) von besonderer Bedeutung, da hierrüber ersichtlich wird, warum beispielsweise eine geringere Geschwindigkeitsempfehlung im Vergleich zur Streckengeschwindigkeit vom System befürwortet wird.

Weiter wurde eine Ausweisung von Verspätungen (55) insbesondere eine Prognose bis zum Aufholen dieser angemerkt. Diese wird sowohl für die Optimierung eines Zuges als auch bei der Vernetzung relevant, da so zielgerichtet und energieeffizient eine Verspätung begrenzt bzw. wieder aufgeholt werden kann.

In Summe werden für dieses Optimierungsziel 22 Kenngrößen identifiziert (vgl. Tabelle 21).

ID	Kenngroße	weiterführende In- formationen	Begründungen für Fahrempfehlung	optional Durch- schnittlicher Ver- brauch; Pünktlichkeit vs. Energieverbrauch
26	Art des Ereignisses	X	X	
27	Ausnahmen	X	X	
<b>33</b>	<b>Grund / Kodierung für Fahrempfehlung</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	
36	Visualisierung	X	X	
38	Zeitstempel Versand der Nachricht	X	X	
54	Störungen	X	X	
25	Zuladung des Zuges / Besetzungsgrad / beförderte Fahrgäste	X		
37	zeitl. Gültigkeit (Start / Ende)		X	
51	Lok- und Personalwechsel (geplant)	X		
<b>55</b>	<b>Verspätung</b>		<b>X</b>	
57	Zeit-Weg-Linie	X		
60	Bahnsteig und Haltepositionen	X		
<b>63</b>	<b>Lok- und Personalwechsellpunkte</b>	<b>X</b>		
77	Energie / Kraftstoff (aktueller)			X
78	Energie / Kraftstoff (spezifischer)			X
79	Energie / Kraftstoff (wegbezogen)			X
80	Leerlauf			X
81	Nebenverbräuche			X
82	Rekuperation (maximal)			X
83	Rückspeisquote			X
84	Tankdaten			X
88	Ist-Zeit System	X		
absteigend nach Anzahl Funktionen; bisher ungenutzte Kenngroßen sind in fett dargestellt				

Tabelle 21: Für die Optimierungsziele der Tf-Akzeptanz notwendige Inputwerte

### 3.2.7. Funktionen zu Fahrgastinformation

Durch die mit vFAS erzielte bessere Datengrundlage lassen sich für den Fahrgast relevante Funktionen wie genaue Ankunftszeiten an den Halten und die Gewährung von Anschlüssen bereitstellen.

ID	Kenngroße	Exakte Ankunft
11	Fahrgeschwindigkeit (aktuell)	X
12	Fahrgeschwindigkeit (maximal, Zug)	X
20	<b>Strecke erlaubte / max. (aus ETCS)</b>	<b>X</b>
25	<b>Zuladung des Zuges / Besetzungsgrad / beförderte Fahrgäste</b>	<b>X</b>
29	<b>Fahrgastwechselaufkommen</b>	<b>X</b>
30	Fahrgeschwindigkeit (optimal) Fall: FAS-C	X
31	<b>Fahrzeit Längen / Kürzen</b>	<b>X</b>
39	Abfahrtszeit Bahnhof	X
40	Ankunftszeit Bahnhof	X
43	<b>Dispositionsfahrplan</b>	<b>X</b>
44	Durchfahrzeit (früheste)	X
45	Durchfahrzeit (späteste)	X
46	Haltezeit / Anpassung (Ist)	X
47	Haltezeit / Mindesthaltezeit	X
48	Haltezeit / Regelhaltezeit (Soll)	X
49	<b>IST-Wert am Referenzpunkt</b>	<b>X</b>
50	Langsamfahrstellen	X
51	<b>Lok- und Personalwechsel (geplant)</b>	<b>X</b>
53	Soll-Wert am Referenzpunkt	X
54	Störungen	X
55	<b>Verspätung</b>	<b>X</b>
58	<b>eingestellter Laufweg</b>	<b>X</b>
59	<b>Fahrstraße (eingestellte)</b>	<b>X</b>
60	Bahnsteig und Haltepositionen	X
62	Höhenprofil / Neigungswechsel	X
63	<b>Lok- und Personalwechsellpunkte</b>	<b>X</b>
64	Neigung	X
65	<b>Signalbild</b>	<b>X</b>
72	Position / Streckenkilometer	X
74	Zugposition	X
76	Korrekturwerte	X
91	Zugnummer	X
absteigend nach Anzahl Funktionen; bisher ungenutzte Kenngroßen sind in fett dargestellt		

**Tabelle 22: Für die Optimierungsziele der Fahrgastinformation notwendige Inputwerte**

Die Ermittlung einer genauen Ankunftsprognose an einem Bahnhof und damit die Ausweisung, ob Anschlusszüge erreicht werden können kann vor allem mit einer Vernetzung und Auswertung des Betriebsgeschehens im Untersuchungsbereich erreicht werden. Wird dieses Ziel allein betrachtet, steckt jedoch noch einiges an Implementierungsaufwand dahinter, da von den 32 identifizierten Kenngrößen zwölf Kenngrößen als neue Kenngrößen identifiziert wurden. Bei einer Berücksichtigung dieser Kenngrößen bei anderen Optimierungszielen sinkt dieser Aufwand jedoch.

### 3.3. Erweiterung der Datengrundlage sowie Anforderungsdefinition

Werden die übergeordneten Optimierungsziele zusammenfassend gemeinsam bewertet, so können die identifizierten Kenngrößen entsprechend ihres Nutzens auf diese Zieleausgewertet werden. Die folgende Tabelle 23 zeigt Kenngrößen sortiert nach der Häufigkeit des Auftretens aller identifizierten Funktionen für vFAS.

Hierbei ist wichtig zu erwähnen, dass lediglich der Einfluss der entsprechenden Kenngröße auf Basis der einzelnen Funktionen (vgl. Abschnitt 3.2) ermittelt wurde, nicht jedoch die unmittelbare Auswirkung auf das Optimierungsziel.

ID	Kenngröße	Energieverbrauch senken	Vermeidung von Lastspitzen	Leistungsfähigkeit erhöhen	Verspätungsabbau/-vermeidung	Verschleiß reduzieren	Akzeptanz des vFAS beim Tf	Fahrgastinformation	Summe
11	Fahrgeschwindigkeit (aktuell)	5	3	4	3	3		1	19
38	Zeitstempel Versand der Nachricht	5	4	4		3	2		18
74	Zugposition	6	3	4	1	3		1	18
14	Gewicht Zug (netto)	5	3	4	2	3			17
50	Langsamfahrstellen	5	3	4	1	3		1	17
62	Höhenprofil / Neigungswechsel	5	3	4	1	3		1	17
3	<b>Bremskurven</b>	5	3	4	1	3			16
12	Fahrgeschwindigkeit (maximal, Zug)	4	2	4	2	3		1	16
20	<b>Strecke erlaubte / max. (aus ETCS)</b>	5	3	4		3		1	16
13	Fahrwiderstände Zug	5	3	4		3			15
19	Neigungswiderstand	5	3	4		3			15
33	<b>Grund / Kodierung für Fahrempfehlung</b>	5	3	2		3	2		15
64	Neigung	5	3	2		3		1	14
88	Ist-Zeit System	5	3		1	3	1		13
7	Beschleunigungsvermögen	4	2	4	1	1			12
28	Ausrollen	5	1	3	1	2			12
55	<b>Verspätung</b>		3	1	3	3	1	1	12
45	Durchfahrzeit (späteste)	5		4	1			1	11
65	<b>Signalbild</b>	5		4		1		1	11
16	Massefaktor	3	2	2		3			10
24	Zugkraft	3	2	4		1			10

<b>25</b>	<b>Zuladung des Zuges / Besetzungsgrad / beförderte Fahrgäste</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>10</b>
44	Durchfahrzeit (früheste)	5		4				1	10
6	Anfahrzugkraft (max.)	4	2	2		1			9
10	Bremsvermögen	4		4	1				9
<b>31</b>	<b>Fahrzeit Längen / Kürzen</b>	<b>5</b>		<b>2</b>	<b>1</b>			<b>1</b>	<b>9</b>
32	Geschwindigkeit; delta	5		4					9
39	Abfahrtszeit Bahnhof		2	1	3	2		1	9
40	Ankunftszeit Bahnhof	1	1	1	3	2		1	9
<b>49</b>	<b>IST-Wert am Referenzpunkt</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>		<b>2</b>		<b>1</b>	<b>9</b>
69	Entfernung zum nächsten Referenzpunkt	5		4					9
75	Zugposition Entfernung zu einem vorausfahrenden Zug	5		3	1				9
4	Bremsstellung	3	1	2		2			8
18	Motorleistung (max, aktuell, Korrektur)	4	2	1		1			8
21	Traktionsleistung; maximum	3	2	2		1			8
34	Korridor Durchfahrtszeit Fall: FAS-O	2		4	2				8
72	Position / Streckenkilometer	4		3				1	8
1	Bremsgewicht	3		2		2			7
2	Bremshundertstel	3		2		2			7
5	Bremssystem des Zuges	3	1		1	2			7
<b>54</b>	<b>Störungen</b>	<b>4</b>					<b>2</b>	<b>1</b>	<b>7</b>
66	Signalposition	3		4					7
77	Energie / Kraftstoff (aktueller)	2	3			1	1		7
37	zeitl. Gültigkeit (Start / Ende)	3		2			1		6
41	Blockbelegungszeiten (Ist-Wert)	3		3					6
70	Örtl. Referenzpunkt; Ende	4		2					6
71	Örtl. Referenzpunkt; Start	4		2					6
9	Bogenwiderstand	3		2					5
23	Widerstände Wagenpark			4		1			5
30	Fahrgeschwindigkeit (optimal) Fall: FAS-C			4				1	5
52	Reserve bis zum nächsten Referenzpunkt	3			2				5
56	Verspätung vorausfahrender Züge	1		1	3				5
<b>59</b>	<b>Fahrstraße (eingestellte)</b>	<b>3</b>		<b>1</b>				<b>1</b>	<b>5</b>
67	Streckenkilometrierung	3		2					5
89	Zuglänge	3		2					5
17	Motor-Drehzahl (max, aktuell, Korrektur)	1	2			1			4
<b>58</b>	<b>eingestellter Laufweg</b>	<b>1</b>		<b>2</b>				<b>1</b>	<b>4</b>
60	Bahnsteig und Haltepositionen			1		1	1	1	4
<b>63</b>	<b>Lok- und Personalwechsellpunkte</b>					<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>4</b>
78	Energie / Kraftstoff (spezifischer)		2			1	1		4
79	Energie / Kraftstoff (wegbezogen)		2			1	1		4

<b>8</b>	<b>besondere Ladungen</b>		<b>1</b>			<b>2</b>			<b>3</b>
22	Traktionsleistungsbedarf		2			1			3
26	Art des Ereignisses				1		2		3
<b>29</b>	<b>Fahrgastwechselaufkommen</b>				<b>2</b>			<b>1</b>	<b>3</b>
81	Nebenverbräuche	1	1				1		3
15	Lastverteilung		1			1			2
27	Ausnahmen						2		2
36	Visualisierung						2		2
<b>46</b>	<b>Haltezeit / Anpassung (Ist)</b>				<b>1</b>			<b>1</b>	<b>2</b>
47	Haltezeit / Mindesthaltezeit				1			1	2
48	Haltezeit / Regelhaltezeit (Soll)				1			1	2
<b>51</b>	<b>Lok- und Personalwechsel (geplant)</b>						<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
68	Entfernung zum letzten Referenzpunkt	1		1					2
80	Leerlauf	1					1		2
82	Rekuperation (maximal)		1				1		2
83	Rückspeisquote		1				1		2
84	Tankdaten	1					1		2
<b>35</b>	<b>Leerlauf vermeiden</b>	<b>1</b>							<b>1</b>
42	Blockbelegungszeiten (Soll-Wert)			1					1
<b>43</b>	<b>Dispositionsfahrplan</b>							<b>1</b>	<b>1</b>
53	Soll-Wert am Referenzpunkt							1	1
57	Zeit-Weg-Linie						1		1
<b>61</b>	<b>Gleistopologie</b>			<b>1</b>					<b>1</b>
76	Korrekturwerte							1	1
85	Position Messstation				1				1
86	Stündl. Temperaturwerte				1				1
87	Wettereinflüsse				1				1
91	Zugnummer							1	1
73	Regionalbereichsnummer								0
<b>90</b>	<b>Zugmodus</b>								<b>0</b>

absteigend nach Anzahl Funktionen; bisher ungenutzte Kenngrößen sind in fett dargestellt

**Tabelle 23: Nutzen der Inputwerte nach Optimierungsziel**

Die aktuelle Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs (11) ist die dabei am häufigsten verwendete Kenngröße. Zu beachten ist, dass diese aber redundant vorliegt und bisher über das GPS-Modul bezogen wird. Die Verwendung der Geschwindigkeit aus dem Fahrzeugsystem erlaubt allerdings eine genauere Berechnung der Fahrempfehlung bzw. Zwischenzustände. Ähnlich verhält es sich mit den Bremskurven aus ETCS (3) und der erlaubten bzw. maximalen Streckengeschwindigkeit aus ETCS (20), welche zwar als ungenutzt markiert sind, aber bei jetzigen Systemen aus anderen Quellen zur Verfügung stehen.

Für den Zugmodus (90) und die Regionalbereichsnummer (73) hingegen wurde kein Anwendungsfall identifiziert. Lediglich der aktuelle Besetzungsgrad bzw. die Zuladung des Fahrzeugs wird für alle Optimierungsziele genutzt. Die meisten anderen Inputwerte können dagegen nur



bei einigen der Ziele eingesetzt werden, wobei zum Teil ein hoher Nutzen für eines der Ziele erreicht wird (siehe beispielsweise die Zugposition, die für alle sechs Unteraufgaben der Energieeinsparung verwendet werden kann). Lediglich 17 der 91 Werte (knapp ein Fünftel) haben einen Nutzen für mindestens die Hälfte der 24 möglichen Optimierungsfunktionen. Dies deutet darauf hin, dass eine gezielte Implementierung einzelner Inputwerte einen größeren Nutzen bringt als ein nicht priorisierter Ansatz.

### 3.4. Aufwand nach Optimierungsziel

Im Folgenden wird ausgewertet, wie viele Inputdaten für die einzelnen Funktionen notwendig sind. Einen Überblick gibt nachfolgende Tabelle 24.

Während für die meisten Funktionen der Kategorie „Erhöhung der Energieeinsparungen“ umfangreiche Inputdaten notwendig sind, benötigt die Funktion „Stillstandszeiten / Systeme in Stand-by / Anwohner schonen“ lediglich sieben Parameter. Neben der Position des Fahrzeugs sind dies u. a. die Motordrehzahl und -leistung, welche der Fahrdynamik zuzuordnen sind. Weiterhin werden Energieverbrauchswerte und Angaben zu Nebenverbrauchern benötigt, welche ebenfalls fahrzeugspezifisch sind. Externe Daten sind hier nicht notwendig, sodass diese Funktion bzgl. der notwendigen Daten vergleichsweise einfach umzusetzen ist. Ein Vernetzungsansatz ist an dieser Stelle allerdings nicht zu finden, da die Inputgrößen globale Größen bzw. zuginterne Größen darstellen.

Die weiteren Inputdaten je vFAS-Funktion sind recht gleichmäßig verteilt. Es sei auf die Funktion „Wetterlage berücksichtigen“ der Rubrik „Verspätungsabbau/-vermeidung“ hingewiesen, für die lediglich sieben Inputfaktoren notwendig sind. Ähnlich der Funktion „Stillstandszeiten“ sind hierfür lediglich zwei Eingangsgrößen zu beziehen, konkret fahrzeugspezifische Parameter und Wetterdaten. Somit ist auch diese Funktion vergleichsweise einfach umzusetzen.

Optimierungsziel	Notwendige Inputwerte
<b>Erhöhung der Energieeinsparung</b>	
Aufwertung von Signal-begriffen/ Halt vermeiden	42
Position und Geschwindigkeit des vorausfahrenden / folg. Zuges / kreuzenden Zuges	46
Fahrstraßenbelegungen/ -auflösungen	46
Beharrungsfahrt ("mittlere" Geschwindigkeit halten / kein einfacher Tempomat)	34
Information Ausrollen möglich	29
Stillstandszeiten / Systeme in Stand-by / Anwohner schonen	7
<b>Abbau und Vermeidung von Verspätungen</b>	
Fahrgastwechsel / -aufkommen / Besetzung der Züge	10
Pufferzeiten ausnutzen	15
Summe der Verspätung über beteiligte Züge verringern	14
Wetterlage berücksichtigen → ggf. kürzere Bremswege	7
<b>Leistungsfähigkeiten</b>	
ingleisige Strecken (Zugkreuzung)	31
Optimierung von Überholvorgängen	47
Vermeidung von unnötigen Halten	45
Fahrstraßen optimal ausnutzen	27
Siehe auch Erhöhung von Energieeinsparungen	s.o.
<b>Vermeidung von elektrischen Lastspitzen</b>	
gezieltes Anfahren (schwächeres Anfahren)	30
Zeitlicher Versatz des Anfahrens (Staffelung)	28
Rekuperation	23
<b>Verschleißarmes Fahren</b>	
unnötiges Bremsen vermeiden	28
Nutzung der elektrischen Bremse → anderes Fahrregime	26
effizienteres Anfahren	29
<b>Akzeptanz bei TF</b>	
weiterführende Informationen	12
Begründungen für Fahrempfehlung	8
optional Durchschnittlicher Verbrauch Pünktlichkeit vs. Energieverbrauch	8
<b>Fahrgastinformation</b>	
ggf. exakte Information Ankunft am nächsten Bahnhof	32

Tabelle 24: Anzahl notwendiger Inputwerte je Optimierungsziel

## 4. Datenmanagementsystem und Schnittstellen

Nachdem die für vFAS vorhandenen bzw. benötigten Daten definiert wurden, befasst sich dieses Kapitel mit dem für die Vernetzung von FAS notwendigen Datenmanagementsystem, prototypischen Architekturen und den dafür zu entwickelnden Schnittstellen.

Für die Vernetzung der Fahrerassistenzsysteme zum Erreichen neuer Optimierungsziele sind prinzipiell zwei Architekturen denkbar:

1. Eine Verknüpfung von Fahrdienstleiter / Disposition und mehreren rechnergestützten Betriebsleitsystemen (RBL) (vorausgesetzt, alle FAS eines Betreibers sind mit diesem RBL verbunden) oder
2. Eine Verknüpfung von Fahrdienstleiter / Disposition und mehreren RBL und FAS auf den Fahrzeugen (ohne zwingende Zwischenebene RBL)

Variante 1 baut auf der verbreiteten Architektur derzeitiger FAS-Implementierungen auf. Die FAS-Instanzen sind über das RBL vernetzt. Gegebenenfalls werden bereits mit dieser Architektur Potentiale durch Vernetzung der Fahrzeuge untereinander erschlossen. Der bisher fehlende Datenaustausch zur Disposition und zu anderen Betreibern wird durch eine zentrale Stelle („FAS-Datenhaltung, vgl. Abbildung 9) ermöglicht. Hier laufen Informationen aus dem RBL und somit zu anderen eingesetzten FAS, des Fahrdienstleiters (Fdl), der Disposition und Informationen anderer RBL zusammen.

Für Variante 1 sind zwei Schnittstellen zu definieren:

- Fdl / Disposition – FAS-Datenhaltung sowie
- RBL – FAS-Datenhaltung.

Die Schnittstelle zwischen RBL und Fahrzeugen liegt in der Verantwortung der RBL-Hersteller. Auf diese bereits vorhandene Schnittstelle wird aufgesetzt, das RBL dient als Zwischenebene. Vorteilhaft hierbei ist, dass auf die vorhandene Kommunikation zwischen RBL und Fahrzeugen aufgesetzt werden kann, sodass Aufgaben wie Datenhaltung, Datenversorgungs- und Entsorgungsprozesse oder Latenzzeiten bereits in Anwendung sind. Somit sind die zusätzlich zu schaffenden Schnittstellen landseitig angesiedelt. Als Basis für Weiterentwicklungen können Standard-Schnittstellen wie die VDV-Schnittstelle 453 (Ist-Daten) und 454 (Referenzdaten Fahrplanauskunft) dienen, mit denen die Kopplung von RBL-Systemen verfolgt wird. Dort sind neben Anforderungen an den Datenaustausch prinzipielle und funktionsübergreifende Anforderungen an die auszutauschenden Daten aufgeführt, was für vFAS fortgeführt werden könnte.

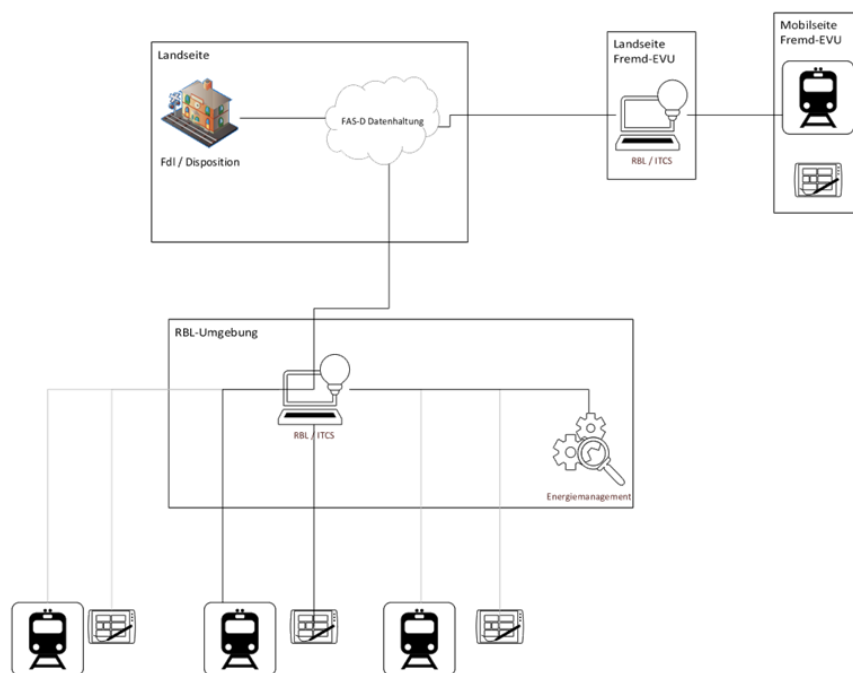


Abbildung 9: Vernetzung von FAS, Variante 1

Variante 2 bringt zusätzlich zur Vernetzung nach Variante 1 eine Schnittstelle zwischen FAS und FAS-Datenhaltung mit sich. Somit ist eine Anknüpfung auch ohne RBL möglich. Dies setzt allerdings eine stetige Kommunikation zu einer Vielzahl an Endgeräten voraus, sodass bei der Umsetzung auch Aspekte wie fehlender Mobilfunkempfang, Datenvolumen, Verfügbarkeit und Latenzzeiten eine Rolle spielen (vgl. Abbildung 10). Hier könnte der Einsatz der 5G Technologie eine Lösung sein. Um diesen zusätzlichen Aspekten, die bei Variante 1 von den RBL übernommen werden, Rechnung zu tragen ist eine zusätzliche Komponente „FAS-D Logik“ notwendig.

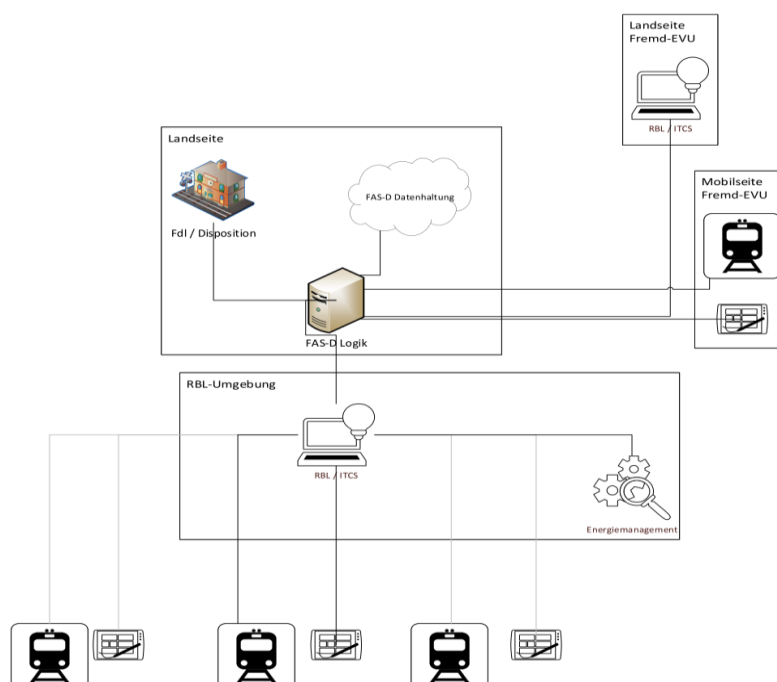


Abbildung 10: Vernetzung von FAS, Variante 2

Der Datenaustausch an den Schnittstellen der einzelnen Komponenten wird in den folgenden Abschnitten erörtert.

An der Schnittstelle zwischen dem Fahrdienstleiter bzw. der Disposition und dem FAS werden alle landseitigen Daten aus den Kategorien Fahrweg und Infrastruktur in die FAS-Datenhaltung eingespielt. Die Fahrdienstleiter bzw. die Disposition empfangen im Gegenzug Ortungs- und Zugdaten wie Geschwindigkeit, Position und Prognose-Zeiten sowie je nach Anwendungsfall Energieverbräuche oder deren Prognose. Im Sinne einer Dispositionsassistentz sind weitere auf den Fahrzeugen berechnete Daten denkbar wie bspw. simulierte Fahrverläufe.

Vom RBL werden zunächst alle für die Berechnung der Fahrempfehlung relevanten Daten der Züge über die FAS-Datenhaltung entgegengenommen. Diese sind in den Kategorien Fahrweg, Infrastruktur, Ortung anderer Fahrzeuge, Fahrplan anderer Fahrzeuge und Zugdaten von anderen Fahrzeugen zu sehen. Das RBL stellt entsprechend Ortungs-, Fahrplan- und Zuginformationen der eigenen Fahrzeuge den entsprechenden FAS bereit.

Bei der direkten Kommunikation zwischen dem FAS auf dem Fahrzeug und der FAS-Datenhaltung gelangen Daten der folgenden Kategorien, dargestellt in Tabelle 25 von den Fahrzeugen auf die Landseite bzw. von der Landseite aufs Fahrzeug.

Fahrzeug zur Landseite	Landseite zum Fahrzeug
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bremssystem</li> <li>▪ Fahrdynamik</li> <li>▪ Fahrplan</li> <li>▪ Ortung</li> <li>▪ Zuginformationen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fahrweg</li> <li>▪ Infrastruktur</li> <li>▪ Ortung anderer Fahrzeuge</li> <li>▪ Zuginformationen anderer Fahrzeuge</li> </ul>

**Tabelle 25: Kommunikation zwischen FAS und FAS-Datenhaltung**

Durch die Vielzahl verschiedener FAS-Ausprägungen ist eine gewissenhafte Schnittstellendefinition notwendig [21]. Eine Validierung der übertragenen Daten ist erforderlich und es muss sichergestellt sein, dass alle Daten den definierten Genauigkeitsanforderungen genügen. Diese Aufgaben übernimmt das Modul „FAS-D Logik“. Nur validierte und den Anforderungen entsprechende Daten werden akzeptiert und in die FAS-Datenhaltung aufgenommen. Weiterhin erfolgt hier das Handling von An- und Abmeldungen der einzelnen Fahrzeuge, die Ermittlung der Aktualität der Daten, das Entfernen von nicht mehr benötigten Daten, die Vermittlung zwischen Fdl / Disposition, RBL- und FAS-Instanzen sowie das Versenden der für FAS relevanten Daten auf die Fahrzeuge und Sicherstellung der Übermittlung.

Die FAS-D Datenhaltung dient lediglich der Ablage gesammelter Daten im definierten Format. Bei Variante 1 werden hieraus direkt Daten vom RBL abgerufen, bei Variante 2 übernimmt die Vermittlung die FAS-D Logik.

Unabhängig von der konkreten Umsetzung durch eine der beiden Varianten ist eine Dispositionsassistentz denkbar. Für die Disposition ist eine präzise Prognose der Dauer eines Konflikts von Bedeutung, was eine genaue Zugfahrtsimulation voraussetzt, welche im FAS integriert ist.

Perspektivisch ist Variante 1 einfacher umzusetzen, schließt aber FAS ohne Anbindung an ein RBL aus. In einem ersten Schritt ist daher diese Variante zur Umsetzung denkbar und kann später auf Variante 2 erweitert werden.

## 5. Validierung und Simulation

Um abschätzen zu können, ob sich der Aufwand für eine Vernetzung der Fahrerassistenzsysteme untereinander und mit der Infrastruktur betrieblich lohnt, wird im Folgenden eine erste Analyse der Potenziale durchgeführt. Die Analyse soll hierfür in zwei Schritte gegliedert werden. Zuerst erfolgt eine qualitative Beschreibung des betrieblich schlechtesten Falls ohne Fahrerassistenz (*worst case*) und des Idealfalls, wenn eine vernetzte Fahrerassistenz größtmöglich optimiert hat (*best case*). Zusammen mit der angenommenen Häufigkeit der beschriebenen betrieblichen Situationen (siehe Tabelle 1 in Abschnitt 2.2) erfolgt eine Vorauswahl der erfolgversprechendsten Szenarien. Diese werden danach im zweiten Schritt quantitativ in einer Simulation auf ihre Wirkung untersucht. Hierbei wird noch keine dynamische Fahrerassistenz simuliert, sondern es werden jeweils *worst case* und *best case* verglichen.

Die Ergebnisse der durch Expertenbefragungen erfolgten qualitativen Beurteilung sind in Tabelle 26 dargestellt.

	<b>worst case</b>	<b>best case</b>	<b>theor. Potenzial</b>	<b>Häufigkeit</b>
<b>Optimierung Fahrtrajektorie</b>	Verspätung/hoher Energieverbrauch	Pünktlich und energieoptimal	mittel	kontinuierlich
<b>Blockabschnittsräumung</b>	Zughalt	Durchfahrt mit verringerter Geschwindigkeit	hoch	oft
<b>Zugkreuzung</b>	Beide Züge halten	Ein Zug kann ohne Halt durchfahren	mittel	mittel
<b>Zugüberholung</b>	Überholter Zug muss anhalten	Fliegende Überholung mit verringerter Geschwindigkeit	mittel	selten
<b>Folgefahrt / Nachfahren</b>	Zughalt	Folgefahrt mit angepasster Geschwindigkeit ohne Halt	hoch	mittel
<b>Fahrstraßenausschluss</b>	Zughalt	Durchfahrt mit verringerter Geschwindigkeit	mittel	mittel

**Tabelle 26: Qualitative Beschreibung der im Einsatz von vFAS erwarteten Potenziale**

Die Optimierung der Fahrtrajektorie eines einzelnen Zugs erfolgt bereits bei existierenden unvernetzten FAS. Die betrieblichen Situationen „Blockabschnittsräumung“ und „Fahrstraßenausschluss“ erfordern vorrangig eine Vernetzung mit der Leitstelle, um eine Anpassung der Fahrtrajektorie an einen zeitlich fixierten Zielpunkt zu ermöglichen. Die Situationen „Zugkreuzung“, „Zugüberholung“ und „Folgefahrt/Nachfahren“ erfordern dagegen ein koordiniertes Zusammenspiel zwischen mehreren Zügen. Daher sollen sie im Folgenden simulativ auf ihr Potenzial untersucht werden.

Die Berechnungen wurden in einer synchronen Simulation mit einer mikroskopischen Berechnung der Zugdynamik auf einem generalisierten Abschnitt der von der ODEG bedienten Strecke Stendal – Jüterbog durchgeführt (vgl. Abbildung 11). Um auch leistungssteigernde Effekte analysieren zu können, wurden mehrere Streckenabschnitte um die Konfliktstelle herum betrachtet.





**Abbildung 11: Betrachteter Streckenabschnitt der ODEG (lila) und Untersuchungsbereich der Berechnung (grün)**

Für die Fälle Zugkreuzung und Zugüberholung wurde der Bahnhof Luckenwalde auf der Strecke Berlin – Jüterbog betrachtet, für die Folgefahrt derselbe Streckenabschnitt aber ohne Nutzung der Bahnhofsgleise. Der Bahnhof besitzt zwei durchgehende Streckengleise mit einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h und je Richtung ein Überholgleis mit Bahnsteig.

Es wurden Züge des Typs Stadler KISS (Baureihe 445) in der Ausführung für die ODEG simuliert, wobei ein Zug im Fall der Folgefahrt nur mit 120 km/h statt der möglichen 160 km/h verkehrt. Die Fahrzeuge sind wie folgt charakterisiert:

- Länge: 105,22 m
- Höchstgeschwindigkeit: 160 km/h
- Dienstmasse: 205,8 t
- Leistung: 3000 kW
- Anfahrzugkraft (genutzt): 170 kN

In den nachfolgenden Abschnitten werden mit den hier beschriebenen Zugcharakteristiken die betrieblichen Situationen der Folgefahrt, der Zugkreuzung und der Zugüberholung simuliert und die Ergebnisse analysiert.

## 5.1. Folgefahrt / Nachfahren

Für den Fall der Folgefahrt von mehreren Zügen wurden zwei Szenarien betrachtet:

- Optimierung auf maximale Streckenleistungsfähigkeit (maxKap)
- Optimierung auf minimalen Energieverbrauch (minEne)

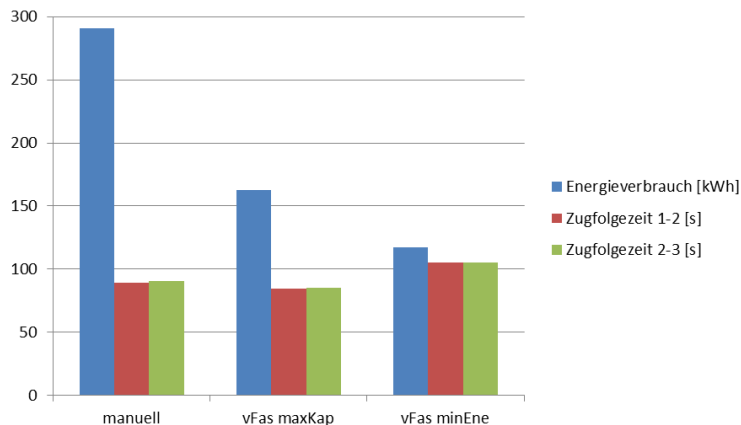
Ziel war es, ein wiederholtes Beschleunigen und Abbremsen an den Blocksignalen zu verhindern, dass bei nicht assistierter Fahrweise durch die Geschwindigkeitsdifferenzen entsteht. Ermittelt wurden die realisierten Energieverbräuche aus Beschleunigungen und Fahrtwiderständen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 27 dargestellt.



Folgefahrt	manuell	vFAS maxKap	vFAS minEne
Energieverbrauch	290,6 kWh	162,6 kWh	117,5 kWh
Zugfolgezeit	89,2 s und 90,6 s	84,4 s und 85,4 s	105,0 s und 105,0 s

**Tabelle 27: Energieverbräuche und Zugfolgezeiten in den Szenarien maxKap und minEne**

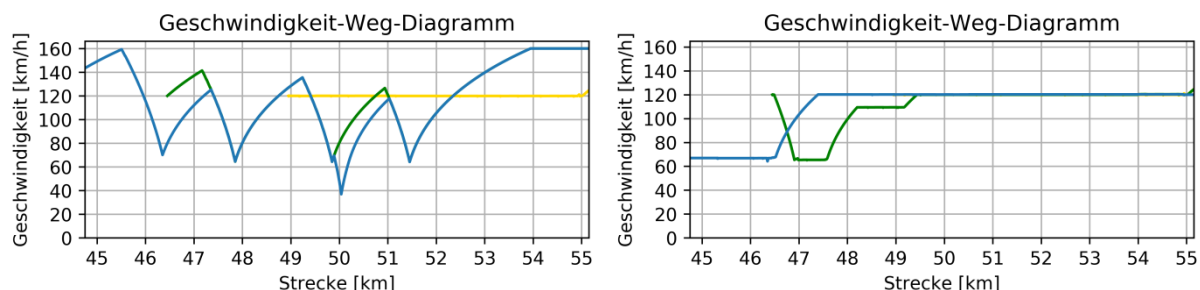
Eine grafische Aufbereitung der Ergebnisse aus Tabelle 27 erfolgt in Abbildung 12.



**Abbildung 12: Grafische Auswertung der Energieverbräuche und Zugfolgezeiten für die Folgefahrt**

Es ist ersichtlich, dass bereits bei der Optimierung für eine maximale Kapazität maßgebliche Energieeinsparungen erzielt werden können. Die erreichbaren Kapazitätsgewinne sind allerdings mit ca. 5 s verringerter Zugfolgezeit nur gering. Die Optimierung auf einen minimalen Energieverbrauch führt dagegen zu einer signifikant erhöhten Zugfolgezeit. Dafür lässt sich durch das vFAS ein Auflaufen auf den vorhergehenden Zug vollständig vermeiden. Der Energieverbrauch auf dem untersuchten Streckenabschnitt sinkt drastisch, um jeweils ca. 60 %. Der große Unterschied entsteht dadurch, dass einem mehrfachen Bremsen und Anfahren eine Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit auf ebener Strecke gegenübersteht. Für die Rekuperation wurde ein Wirkungsgrad von 40 % angenommen, welcher die großen Aufwände zum wiederholten Beschleunigen jedoch nicht aufwiegt.

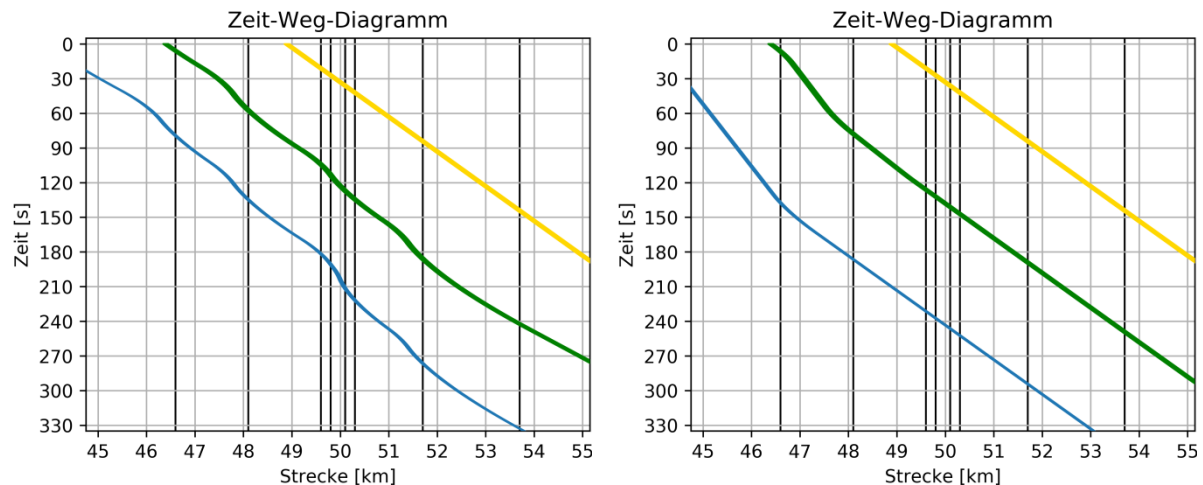
Abbildung 13 zeigt den Verlauf des Geschwindigkeitsverlauf der drei Züge über die Strecke, wobei die geregelte Fahrt mit der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Zugs (im simulierten Fall 120 km/h) gut erkennbar ist. Die Linien überlagern sich bei gleicher Geschwindigkeit.



**Abbildung 13: Vergleich der Geschwindigkeitsdiagramme ohne FAS (links) und mit vFAS (rechts).**

Es konnte gezeigt werden, dass eine dynamische Reaktion auf den vorausfahrenden Zug entweder einen stabilen Betrieb bei minimaler Zugfolge oder Energieeinsparungen im Bereich von 60 % im betroffenen Streckenabschnitt bei verringerter Streckenkapazität ermöglicht.

In Abbildung 14 sind die Zeit-Wege-Linien in den Modi ohne FAS und mit vFAS (energieoptimiert) abgebildet.



**Abbildung 14: Vergleich der Zeit-Wege-Linien für die Folgefahrt mit unvernetztem FAS (links) und vFAS minEne (rechts)**

Teilweise wurden weitere Berechnungen und Bewertungen in [26] bzw. [27] veröffentlicht.

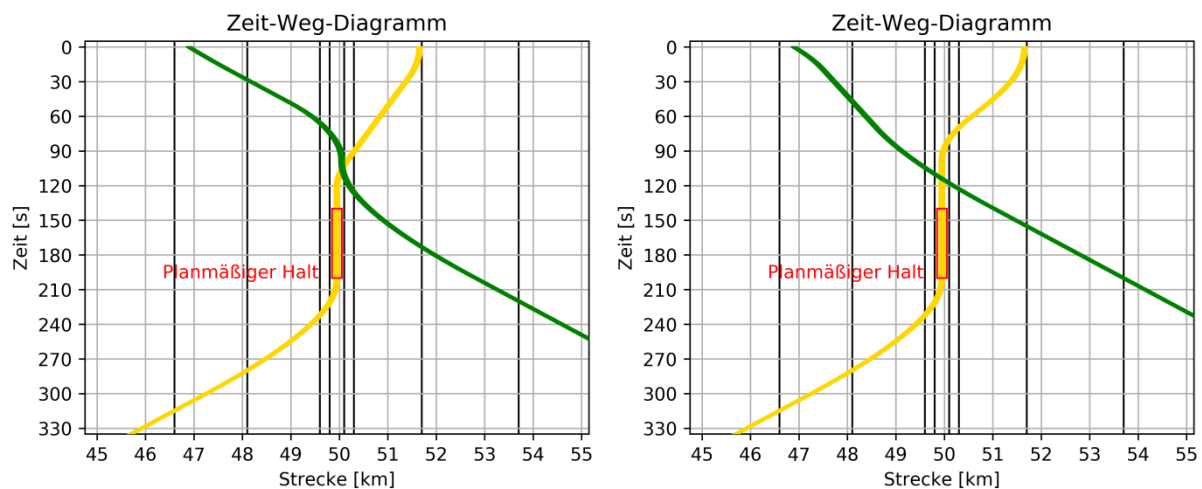
## 5.2. Zugkreuzung

Im simulierten Fall der Zugkreuzung entsteht ein Konflikt, da der durchfahrende Zug abweichend zu seiner Fahrplanlage verspätet verkehrt. Der haltende Zug ist dagegen planmäßig unterwegs und hat sogar eine kleine Fahrzeitreserve bis zum Halt in Luckenwalde (vgl. Abbildung 11) eingeplant.

Die betriebliche Situation wird anhand von Zeit-Wege-Linien für beide Fälle in nachfolgender Abbildung 15 dargestellt. Der durchfahrende Zug ist dabei grün gezeichnet, der haltende gelb.

In der heutigen Situation mit einem nicht vernetzten FAS würde der haltende Zug (gelb) seine Trajektorie auf eine energiesparende Fahrweise ausrichten und die Fahrzeitreserve für eine langsamere Fahrt nutzen. Der durchfahrende Zug (grün) verkehrt dagegen mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, da der Triebfahrzeugführer versucht, die vorhandene Verspätung wieder herauszufahren. Es kommt zu einem Konflikt, wodurch der durchfahrende Zug am Ausfahrtsignal bis zum Stillstand abbremsen muss. Die Signalstandorte sind in der Abbildung durch schwarze Linien gekennzeichnet.

Bei Einsatz eines vFAS können die Züge ihr Verhalten dagegen koordinieren. So fährt der haltende Zug (gelb) etwas schneller in das Überholgleis, um die Strecke entsprechend schneller zu räumen. Der durchfahrende Zug (grün) verlangsamt seine Fahrt dagegen noch vor dem Bahnhof, wodurch er das Ausfahrtsignal erst erreicht, als dieses auf „Fahrt erwarten“ schaltet. Somit kann er ohne Eingriff der Zugbeeinflussung den Bahnhof mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit durchfahren.



**Abbildung 15: Vergleich der Zeit-Weg-Linien für eine Zugkreuzung mit unvernetztem FAS (links) und vFAS (rechts)**

Im Vergleich ist ersichtlich, dass der durchfahrende Zug (grün) mit einem vFAS circa 20 s früher seine Fahrt fortsetzen kann als ohne FAS. Gleichzeitig tritt auf dem betrachteten Streckenabschnitt in der Summe beider Züge eine Energieeinsparung ein, wobei die leicht energieintensivere Fahrt des haltenden Zugs durch die behinderungsfreie Fahrt des durchgehenden Zugs kompensiert werden kann (188,1 kWh mit FAS, 181,9 kWh mit vFAS).

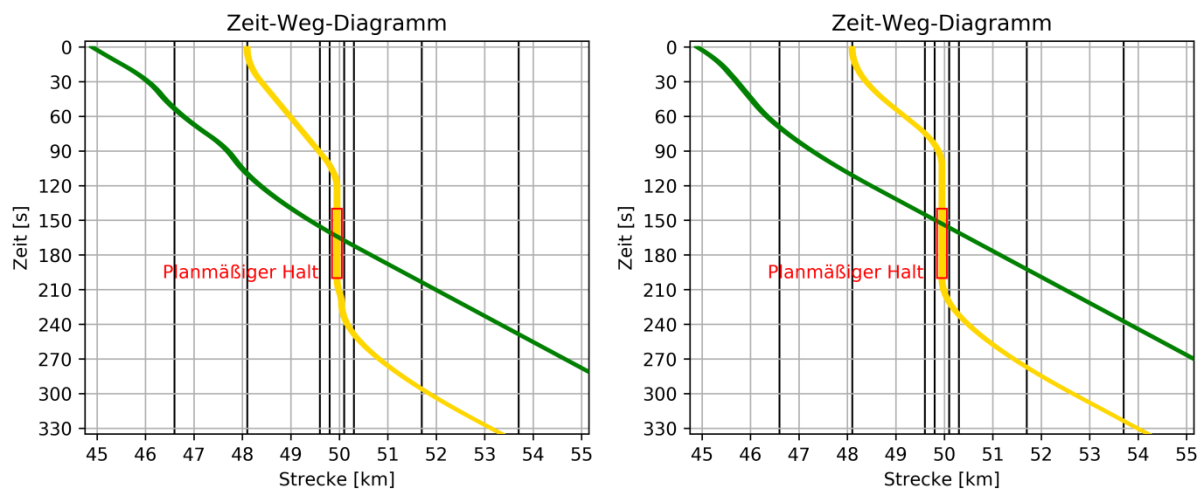
Für eine praktische Implementierung mit mehreren beteiligten EVU ist es daher notwendig, Ausgleichszahlungen oder andere Mechanismen vorzusehen, um die gesamtbetriebliche Optimierung nicht zu Lasten einzelner EVU (wie hier im Beispiel dem des haltenden Zugs) gehen zu lassen. Bei einer Nutzung innerhalb der Flotte eines EVU wäre dies hingegen kein Problem.

### 5.3. Zugüberholung

Wie im vorhergehenden Fall der Zugkreuzung wurde für die Zugüberholung der Bahnhof Luckenwalde (vgl. Abbildung 11) betrachtet, wobei sich zwei Züge der ODEG-Baureihe 445 überholen.

Auch hier kommt es im Fall eines nicht vernetzten FAS zu einem Konflikt (vgl. Abbildung 16, links), wobei der durchfahrende Zug mehrfach auf den haltenden Zug aufläuft und an Blocksignalen seine Geschwindigkeit teilweise bis zum Stillstand reduzieren muss. Zusätzlich kommt es durch die verzögerte Durchfahrt des Zuges zu einer Behinderung des haltenden Zugs, der nach seinem planmäßigen Fahrgastwechsel noch nicht auf die Strecke ausfahren kann. Dort wird der erste Blockabschnitt nach dem Bahnhof noch vom durchfahrenden Zug belegt. Somit sind beide Züge von der nicht koordinierten Überholung betroffen und erhalten eine zusätzliche Verspätung.

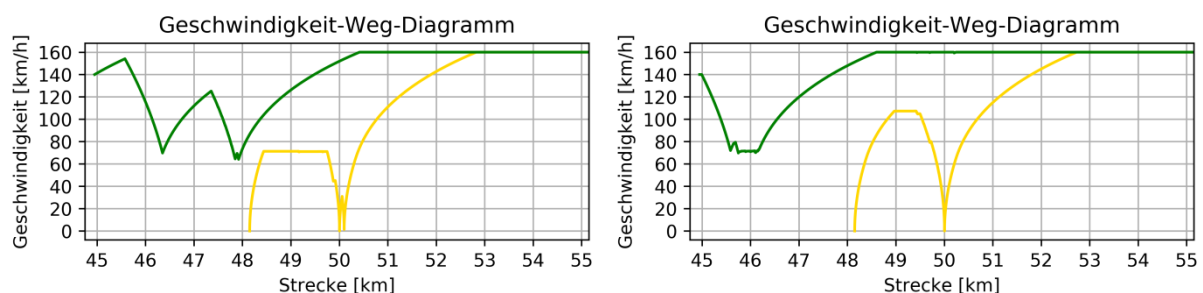
Durch eine Vernetzung der Züge können diese ihr Verhalten aufeinander abstimmen (vgl. Abbildung 16, rechts). Der haltende Zug fährt trotz der vorhandenen Fahrzeitreserve schnell in das Überholgleis ein, sodass sowohl die Blockabschnitte vor dem Bahnhof als auch die Durchfahrt durch den Bahnhof zeitiger frei sind. Der durchfahrende Zug verlangsamt seine Fahrt leicht und erreicht so die Vorsignale jeweils erst, wenn diese „Fahrt erwarten“ zeigen. Wie im vorausgehenden Abschnitt 5.2 wurden die Zugfahrten anhand von Zeit-Weg-Linien in Abbildung 16 dargestellt. Der haltende und zu überholende Zug ist gelb und der durchfahrende Zug in grün dargestellt.



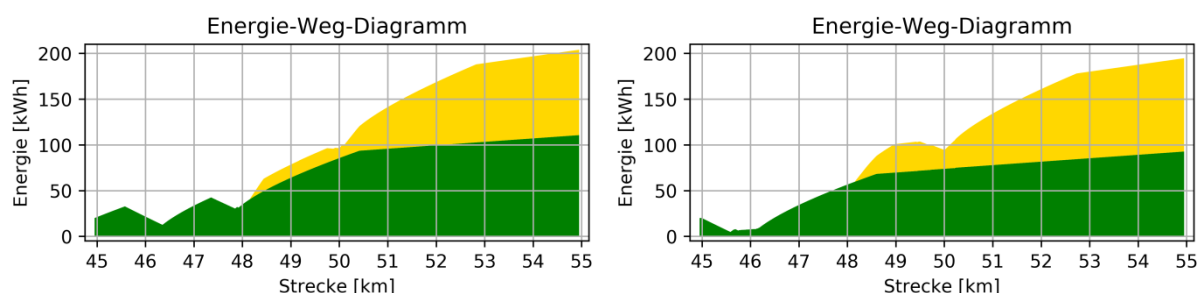
**Abbildung 16: Vergleich der Zeit-Weg-Linien für eine Zugüberholung ohne (links) und mit vFAS (rechts)**

Während der durchfahrende Zug durch den Einsatz eines vFAS eine knapp 15 s frühere Fahrlage erreicht, kann der haltende Zug sogar fast 25 s früher seine Fahrt fortsetzen. Der Energieverbrauch beider Züge auf dem betrachteten Abschnitt kann gleichzeitig um ca. 5 % von 204,0 kWh auf 194,7 kWh reduziert werden. Das Manöver ist damit sowohl betrieblich als auch wirtschaftlich erfolgreich.

Abbildung 17 zeigt die Geschwindigkeitsverläufe und Abbildung 18 den jeweiligen Verlauf der Energieverbräuche für beide Fälle. Gut zu sehen sind die Geschwindigkeitseinbrüche des durchfahrenden Zugs (grün) im Fall ohne vFAS (links). Mit vFAS erfolgt dagegen eine kontrollierte Verzögerung auf ca. 70 km/h, wodurch ein vollständiger Halt vermieden werden kann. Der haltende Zug (gelb) fährt dagegen mit 110 statt 70 km/h in Richtung Bahnhof.



**Abbildung 17: Vergleich der Geschwindigkeitsdiagramme ohne (links) und mit vFAS (rechts)**



**Abbildung 18: Vergleich der Energieverbräuche ohne (links) und mit vFAS (rechts)**

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Die zunehmende Digitalisierung der Schiene bietet im Bereich der Fahrerassistenzsysteme die Möglichkeit, bei der Fahrempfehlung neben einer reinen Optimierung der Fahrtrajektorie eines Fahrzeuges noch weitere Aspekte zu berücksichtigen um eine optimale Ausnutzung von Effekten mehrerer Züge, Verkehrsunternehmen übergreifend, zu ermöglichen, ist eine Vernetzung der Assistenzsysteme sinnvoll.

Durch diese Vernetzung und die Nutzung einer zusätzlichen Datengrundlage können potenziell Energieeinsparungen eines einzelnen Zuges weiter erhöht werden, aber auch Betriebsabläufe in komplexen Situationen des Bahnbetriebs vorausschauend optimiert und so Betriebsbehinderungen vermieden werden. Dies hat wiederum positive Auswirkung auf die Streckenkapazität oder den Abbau von Verspätungen. Durch unnötige Bremsvorgänge können sowohl der Energieverbrauch als auch die Lärmemissionen und der Verschleiß verringert werden.

Während die Erhöhung der Leistungsfähigkeit vor allem aus Sicht der Infrastrukturbetreiber einen entscheidenden Vorteil von vernetzten Fahrerassistenzen bietet, profitieren Verkehrsunternehmen überwiegend aus den Einsparungen, welche sich aus dem Energiebedarf oder des verschleißarmen und vorrausschauenden Fahrens ergeben. Ein weiterer Aspekt, welcher vor allem für die Verkehrsunternehmen relevant ist, ist die Vermeidung von elektrischen Lastspitzen die durch das gleichzeitige Anfahren mehrerer Züge entstehen können. Diese Lastspitzen sind für das Verkehrsunternehmen relevant zur Berechnung des Jahresenergieverbrauches und der zu zahlenden Pauschalen. Über eine zeitliche Staffelung im Zuge der Flottenoptimierung kann sowohl eine Verteilung der Energieaufnahme, als auch der Rückspeisequote bei der Rekuperation angestrebt werden.

Bei der Identifizierung des benötigten Dateninputs wurde sowohl auf die Verfügbarkeit als auch auf den Datenursprung geachtet. Neben der durchgeführten Recherche auf Basis von marktreifen FAS, wurde auch die Möglichkeit einer Vernetzung der Systeme und die dafür benötigten zusätzlichen Daten analysiert. Auf dieser Basis konnten im Anschluss erweiterte als auch mögliche neue Funktionen identifiziert werden und die entsprechenden Datengrundlagen weiter ergänzt werden. Für die Aufbereitung aller Kenngrößen wurde der Datenursprung sowohl in eine statische, dynamische oder aggregierte Datengrundlage unterteilt und aufgelistet, wo und wie diese Daten bereits im Eisenbahnumfeld vorliegen.

Die anschließende Simulation konnte für alle drei betrachteten Situationen große betriebliche und wirtschaftliche Potenziale einer Vernetzung der FAS nachweisen. Im Fall der Folgefahrt überwiegen hierbei die Energieeinsparpotenziale gegenüber einer kleinen Verbesserung der Streckenleistungsfähigkeit. Bei Zugkreuzungen und -überholungen kann dagegen ein signifikanter Verspätungsabbau bei leicht sinkendem Energiebedarf erreicht werden. Somit ist sowohl für EVU als auch für EIU ein Anreiz für die Implementierung und flächendeckende Nutzung von vFAS gegeben. Die zu erwartenden Resultate skalieren dabei mit der Anzahl auftretender betrieblicher Situationen, in denen das vFAS optimierend eingreifen kann. Dies ist nur der Fall, wenn beide beteiligten Züge mit einem vFAS ausgerüstet sind, weshalb eine möglichst flächendeckende Nutzung anzustreben ist.

Zusammenfassend konnte mit der hier vorliegenden Machbarkeitsanalyse beispielhaft gezeigt werden, dass eine vernetzte Fahrerassistenz ein hohes Potential sowohl für die Optimierung eines Zuges, als auch für die Interaktion mit mehreren Zügen, in einem Infrastrukturbereich birgt. Es erscheint sinnvoll, diesen Ansatz weiter zu untersuchen. Beispielsweise müssen tiefergehende

Fragen zur Datenverfügbarkeit und der entsprechenden vorliegenden Qualität geklärt werden. Um eine weitere Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen zu ermöglichen, ist es erforderlich, das hier skizzierte Datenmanagementsystem sowie die entsprechenden Schnittstellen für die Kommunikation zwischen den einzelnen Zügen mit der Leistelle und ggf. auch mit der Infrastruktur tiefergehend zu definieren. Es ist wichtig, dass auch unterschiedliche Züge verschiedener Verkehrsunternehmen auf eine identische und diskriminierungsfreie Datengrundlage zugreifen können, um im Sinne eines vorrausschauenden Fahrens und der optimalen Ausnutzung der Leistungsfähigkeiten die bestmöglichen Ergebnisse erzielen zu können. Ein weiterer wichtiger Faktor für die Wirksamkeit von vFAS ist die Akzeptanz des Systems durch die Tf. Nur bei einer hohen Befolgungsrate der Fahrempfehlungen können die Verbesserungen greifen. Aber auch hier können mehr Informationen über das Betriebsgeschehen dazu beitragen, die Transparenz der Fahrempfehlungen und damit auch die Akzeptanz beim Tf zu erhöhen.

Die hier ermittelten Vorteile und Einsparungen des FAS / vFAS mit erweiterter Datenbasis greifen bereits im Regelbetrieb mit erfahrenen Tf. Weiteres Einsparpotenzial lässt sich vermuten, wenn ein EVU den Betrieb nach gewonnener Ausschreibung auf bis dahin für das EVU unbekannten Strecken aufnimmt. Diese Strecken können sich die Tf erst mit Betriebsaufnahme durch genaue Kenntnisse schrittweise aneignen, dabei sind (v)FAS besonders hilfreich und werden vermutlich zusätzliche Potenziale in Form von Energieeinsparung, Pünktlichkeit und Streckenkapazität erzielen.

## Literaturverzeichnis

- [1] DB NETZ AG: *Grüne Funktionen der Zuglaufregelung - Unterstützung einer energiesparenden Fahrweise durch Echtzeit-Betriebsdaten der DB Netz AG*. 2018
- [2] SBB: *The swiss way to capacity optimization for Traffic Management – Rail Control System Adaptive Lenkung (RCS ADL)*. 2018
- [3] BICKELL, David: *Thameslink signalling update*. 2017
- [4] LAGOS, Mario: *Cato offers energy savings, 2015*. 2015
- [5] DB KOMMUNIKATIONSTECHNIK GMBH: *FASSI-System - Energieeffizienz, Ökologie, Pünktlichkeit*. 2014
- [6] KERWIEN, Daniel ; STEINBRINK, Gernot ; REIHER, Patrick ; KRIMMLING, Jürgen: *Innovative und energieoptimale Zugsteuerung mit DatNet und smarttrains*. In: *Der Eisenbahningenieur (EI)* (2017), Nr. 11
- [7] SCHUMANN, Tilo: *Next Generation Operation: Energieeffizienter Bahnbetrieb : Assistenzsysteme für den Triebfahrzeugführer zum energiesparsamen Fahren*. 2010
- [8] MRK MANAGEMENT CONSULTANTS GMBH: *Marktüberblick Fahrerassistenzsysteme*. 2018
- [9] KOOPMANN, Vera ; SCHUMANN, Tilo: *Leiser an der Bahnstrecke*. In: *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) Magazin; ISSN 2190-0094* (2016), Nr. 149, S. 46–47
- [10] KRIMMLING, Jürgen: *Fahrerassistenzsysteme zum energiesparenden Fahren* (Vortrag zur mo-fair Vorstandssitzung). Berlin, 17.01.2018
- [11] RITZER, Philip ; FLAMM, Leander ; MEIRICH, Christian: *Vergleich von Fahrerassistenzsystemen : DAS-C versus DAS-O*. Braunschweig, unveröffentlicht
- [12] KRIMMLING, Jürgen: *Einführung in die Verkehrstelematik* (Vorlesung an der TU Dresden). Dresden, 2018
- [13] MCKINSEY & COMPANY: *Machbarkeitsstudie zum Rollout von ETCS/DSTW - Zusammenfassung der Ergebnisse*. URL [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/machbarkeitsstudie-digitalisierung-schiene.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/machbarkeitsstudie-digitalisierung-schiene.pdf?__blob=publicationFile)
- [14] DB NETZ AG: *Grüne Funktionen der Zuglaufregelung : Systembeschreibung*
- [15] HOFFMANN, Michael Theodor ; BÖTTCHER, Jochen: *Entwicklung und Einführung der Zuglaufregelung : Vernetzte Fahrerassistenzsysteme*. In: *Deine Bahn* (2018), Nr. 10, S. 6–13
- [16] NIEBEL, Nora ; NIEBEN, Nils: *Berücksichtigung des Zacken-Lücken-Problems bei der analytischen Kapazitätsermittlung*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)* (2014), Nr. 12, S. 34–37
- [17] GAST, Ingolf ; NIEBEL, Nora ; NIEBEN, Nils: *Zacken-Lücken-Problem in der Praxis*. In: *Deine Bahn* 42 (2014), Nr. 12, S. 36–39
- [18] SCHUMANN, Tilo ; UMMELS, Michael: *Operatives Verkehrsmanagement für einen energieeffizienten Bahnbetrieb*. In: *EI - Der Eisenbahningenieur* (2015), 06/15, S. 36–40. URL <https://elib.dlr.de/95717/>



- [19] CLAUS, Sören ; AMMOSER, Hendrik: *Digitalisierung der Bahn mit FASSI 4.0*. In: *ATZ extra Sonderheft für die VDI-FVT 2018/2019*, S. 30–32
- [20] WEIGELT, Niels ; HASSE, Steffen: *Fahrassistenzsystem LEADER im Einsatz bei DB Cargo*. In: *Deine Bahn* (2018), Nr. 10, S. 46–49
- [21] DB NETZ AG | I.NPB 1(I) | ZLRGF: *Grüne Funktionen der ZLR : Fachliche Schnittstellenbeschreibung DAS-C und DAS-O*. 18.05.2018
- [22] WENDE, Dietrich: *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2003
- [23] FICHTL, Holger ; LINDEMANN, Philipp ; PREISSLER, Uwe: *Informationsgewinn aus fusionierten Fahrzeug- und Betriebsdaten*. In: *Der Eisenbahningenier (EI)* (2017), Juli, S. 34–37
- [24] HABERMANN, Volker: *Effiziente Energieverwendung bei DB Fernverkehr*. In: *Deine Bahn* (2011), Nr. 8, S. 21–24
- [25] WEIDNER, Tibor: *Vernetzte Fahrerassistenzsysteme – aktuelle Entwicklungen bei der DB Netz AG*. In: DEDONKER, Rik W.; NIEBEN, Nils; SCHINDLER, Christian (Hrsg.): *Tagungsband / Proceedings of 2nd International Railway Symposium Aachen (IRSA) 2019*. Aachen : Publikationsserver der Universitätsbibliothek / Publication Server of the University Library RWTH Aachen University, 2019, S. 386–400
- [26] MEIRICH, Christian ; FLAMM, Leander ; KRIMMLING, Jürgen ; JÄGER, Bärbel: *Betriebliche Optimierung des Eisenbahnbetriebs mittels vernetzter Fahrerassistenzsysteme*. In: DEDONKER, Rik W.; NIEBEN, Nils; SCHINDLER, Christian (Hrsg.): *Tagungsband / Proceedings of 2nd International Railway Symposium Aachen (IRSA) 2019*. Aachen : Publikationsserver der Universitätsbibliothek / Publication Server of the University Library RWTH Aachen University, 2019, S. 358–372
- [27] MEIRICH, Christian ; FLAMM, Leander ; KRIMMLING, Jürgen ; JÄGER, Bärbel: *Betriebliche Optimierung des Eisenbahnbetriebs mittels vernetzter Fahrerassistenzsysteme*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau (ETR)* (2020), Nr. 03

## Anhang

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
1	Bremsgewicht	%	Bremssystem	Zug	experimentell bestimmt / techn. Datenblatt		
2	Bremshundertstel	%	Bremssystem	Zug	Zug		Bremsgewicht; Masse des Zuges
3	Bremskurven	-	Bremssystem	Sicherungstechnik / Zug	ETCS (> L2) OBU	teilw. Abh. vom Gewicht	Ist-Daten Berechnung
4	Bremsstellung	R, P, G	Bremssystem	Zug	Feldbussystem		
5	Bremssystem des Zuges	E, P, Mg, ...	Bremssystem	Zug	vorhandene Systeme des Zugs / fahrdyn. Datenblätter	aktuelle Auswahl des Systems (Bordgerät)	Berechnung der aktuellen Zug-Bremskurven
6	Anfahrzugkraft (max.)	kN	Fahrdynamik	Zug	fahrdyn. Datenblätter		
7	Beschleunigungsvermögen	m/s <sup>2</sup>	Fahrdynamik	Zug	fahrdyn. Datenblätter		Fahrdyn. Berechnung
8	besondere Ladungen		Fahrdynamik	Zug	Leitstelle		
9	Bogenwiderstand	N / kN	Fahrdynamik	FAS / Infrastruktur			Berechnung
10	Bremsvermögen	m/s <sup>2</sup>	Fahrdynamik	Zug	fahrdyn. Datenblätter		abh. v. Bremssystem, Masse und Streckenprofil
11	Fahrgeschwindigkeit (aktuell)	km/h	Fahrdynamik	Zug		Messwerte Bordsystem / Feldbussystem	GPS
12	Fahrgeschwindigkeit (maximal, Zug)	km/h	Fahrdynamik	Zug	fahrdyn. Datenblatt		
13	Fahrwiderstände Zug	N / kN	Fahrdynamik	Zug	Länge, aerodyn. Beiwerte, Lagerreibung	Masse, Geschwindigkeit (ist)	Widerstandskraft Zug
14	Gewicht Zug (netto)	t	Fahrdynamik	Zug	techn. Datenblatt		
15	Lastverteilung		Fahrdynamik	Zug			
16	Massefaktor	-	Fahrdynamik	Zug	fahrdyn. Datenblätter		
17	Motor-Drehzahl (max, aktuell, Korrektur)	UpM	Fahrdynamik	Zug	techn. Datenblatt (max)	Feldbussystem / (akt.) Messwerte	Korrektur: Abgleich Messwandler (Soll/Ist)

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
18	Motorleistung (max, aktuell, Korrektur)	kW	Fahr-dynamik	Zug	techn. Datenblatt (max)	Feldbussystem / (akt.) Messwerte	Korrektur: Abgleich Messwandler (Soll/Ist)
19	Neigungswiderstand	N / kN	Fahr-dynamik	FAS / Infrastruktur			Berechnung aus Neigung und Masse des Zuges
20	Streckengeschwindigkeit erlaubte / max. (aus ETCS)	km/h	Fahr-dynamik	Infrastruktur / Stellwerk / Leitstelle	Zs 3-Signal / Balisen ETCS (> L2) / Fahrplan	LeiDis (Ist-Wert)	Spurplan / Position / (eingestellte Fahrstraße)
21	Traktionsleistung; maximum	kW	Fahr-dynamik	Zug	fahrdyn. Datenblätter / experimentell bestimmt		
22	Traktionsleistungsbedarf	Kwh	Fahr-dynamik	Zug			Berechnung auf Basis der Fahrgeschwindigkeit
23	Widerstände Wagenpark	N / kN	Fahr-dynamik	Zug	Messwerte / fahrdyn. Datenblätter	Sensorik	Berechnung
24	Zugkraft	kN	Fahr-dynamik	Zug	fahrdyn. Datenblätter		Berechnung abh. von Geschwindigkeit
25	Zuladung des Zuges / Besetzungsgrad / beförderte Fahrgäste	t / %	Fahr-dynamik	Zug	Tages- / Wochenganglinien	Messeinrichtung / Zähl-einrichtungen / Videoauswertung	
26	Art des Ereignisses	-	Fahrempfehlung	FAS Leitstelle			
27	Ausnahmen	-	Fahrempfehlung	FAS			
28	Ausrollen	Ja / Nein	Fahrempfehlung	FAS Leitstelle			Berechnung System
29	Fahrgastwechselaufkommen	Pax	Fahrempfehlung	Leitstelle / Zug	Tages- / Wochenganglinien	Ticketsystem (Kontrolle)	
30	Fahrgeschwindigkeit (optimal)	Km/h	Fahrempfehlung	FAS Leitstelle			Berechnung System
31	Fahrzeit längen / kürzen	-	Fahrempfehlung	TF / FAS	Aktiver Eingriff durch TF	Betriebslage / Fahrempfehlung	
32	Geschwindigkeit; delta	km/h	Fahrempfehlung	FAS			aktuelle Geschwindigkeit zu Empfehlung bzw. Streckenvorgabe
33	Grund / Kodierung für Fahrempfehlung	-	Fahrempfehlung	FAS		LeiDis: Reserven / Verspätungen, andere Zugfahrten	

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
34	Korridor Durchfahrzeit	hh:mm:ss	Fahrempfehlung	Leitstelle Zug			Durchfahrzeit (früh. / spät.)
35	Leerlauf vermeiden	-	Fahrempfehlung	FAS			Abgleich Fahrplan & Position
36	Visualisierung	-	Fahrempfehlung	FAS		lokale Berechnung	Output / Berechnung
37	Zeitl. Gültigkeit (Start / Ende)	hh:mm:ss	Fahrempfehlung	FAS Leitstelle	Systemoutput		
38	Zeitstempel Versand der Nachricht	hh:mm:ss	Fahrempfehlung	FAS	Output		
39	Abfahrzeit Bahnhof	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan (Soll) RUT-K EBUa	LeiDis (Ist)	Abh. v Mindesthaltezeit, Fahrplanlage & Geschwindigkeit
40	Ankunftszeit Bahnhof	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan (Soll) RUT-K EBUa	LeiDis (Ist)	verbleibende Zeit, abh. von Fahrplanlage & Geschwindigkeit
41	Blockbelegungszeiten (Ist-Wert)	s	Fahrplan	Leitstelle / Zug / Stellwerk		Stellwerk z.B. über Relais oder entsprechende Schnittstelle	
42	Blockbelegungszeiten (Soll-Wert)	s	Fahrplan	Leitstelle	RUT-K		
43	Dispositionsfahrplan	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan / RUT-K	LeiDis (Ist-Wert)	
44	Durchfahrzeit (früheste)	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle / Zug		LeiDis (Ist-Wert)	Position mehrerer Züge / Fahrplanlage / Sperrzeiten
45	Durchfahrzeit (späteste)	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle / Zug		LeiDis (Ist-Wert)	Position mehrerer Züge / Fahrplanlage / Sperrzeiten
46	Haltezeit Anpassung (IST)	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Tages- & Wochenganglinien	LeiDis (Ist)	
47	Haltezeit / Mindesthaltezeit	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan (Soll) RUT-K EBUa	LeiDis (Ist)	
48	Haltezeit / Regelhaltezeit (Soll)	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan (Soll-Wert)		
49	IST-Wert am Referenzpunkt	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle / Zug		LeiDis (Ist-Wert)	Verspätung / Reserve → Abgleich Position und Uhrzeit
50	Langsamfahrstellen	km & km/h	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan / Beta		
51	Lok- und Personalwechsel (geplant)	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan	LeiDis / Leitstelle / tagesaktueller Buchfahrplan (TaBuFa)	

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
52	Reserve zum nächsten Referenzpunkt	hh:mm:ss	Fahrplan	FAS Leitstelle			Berechnung System
53	Soll-Wert am Referenzpunkt	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle	RUT-K / EBuLa		
54	Störungen	-	Fahrplan	Stellwerk / Leitstelle			
55	Verspätung	hh:mm:ss	Fahrplan	FAS Leitstelle			Berechnung System
56	Verspätung vorausfahrender Züge	hh:mm:ss	Fahrplan	Leitstelle		LeiDis (Ist-Wert)	
57	Zeit-Weg-Linie	-	Fahrplan	Leitstelle	Fahrplan	LeiDis (Ist-Wert)	Abweichungen (Soll/Ist)
58	eingestellter Laufweg		Fahrweg	Stellwerk	Spurplan	Zuglaufreglung (ZLR)	
59	Fahrstraße (eingestellte)	-	Fahrweg	Stellwerk	Spurplan (Da-Vit)	Fahrweg / -straße	
60	Bahnsteig und Haltepositionen	m	Infrastruktur	FAS	Spurplan	Ortung	Ortung und Spurplan
61	Gleisstopologie	-	Infrastruktur		Stellwerk / Spurplan		
62	Höhenprofil / Neigungswechsel		Infrastruktur	Leitstelle	Spurplan / Messfahrten		
63	Lok- und Personalwechselpunkte	km	Infrastruktur	Leitstelle	Spurplan		
64	Neigung	‰	Infrastruktur	Zug			Abgleich Position und Höhenprofil
65	Signalbild	-	Infrastruktur	Stellwerk FAS Leitstelle	Stellwerk		
66	Signalposition	km	Infrastruktur	Leitstelle / Stellwerk	Spurplan		
67	Streckenkilometrierung	km	Infrastruktur	Leitstelle	Infrastrukturdaten / E-BuLa-Fahrplan		
68	Entfernung zum letzten Referenzpunkt	m	Ortung	Zug / Leitstelle	Referenzpunkte auf Strecke	GPS-Antenne	Berechnung aus Zugposition und Referenzpunkt
69	Entfernung zum nächsten Referenzpunkt	m	Ortung	Leitstelle Zug	Referenzpunkte auf Strecke	GPS	Berechnung aus Position Zug und Referenzpunkt
70	Örtl. Referenzpunkt; Ende	km	Ortung	FAS	Balisen	GPS-Antenne	
71	Örtl. Referenzpunkt; Start	km	Ortung	FAS	Balisen	GPS-Antenne	

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
72	Position / Streckenkilometer	m / km	Ortung	Zug / Leitstelle			
73	Regionalbereichsnummer	1 - 8	Ortung	Stellwerk / Leitstelle			
74	Zugposition	km / Koordinaten	Ortung	Zug / Leitstelle	Zug: LZB-Rechner; ETCS OBU (ETCS (> L2))		
75	Zugposition Entfernung zu einem vorausfahrenden Zug	km	Ortung	Stellwerk: Zuglaufregelung (ZLR)"	GPS-Antenne / Odometer		
76	Korrekturwerte		Systemeichung	Zug			Delta zwischen gemessenen und berechneten Werten
77	Energie / Kraftstoff (aktueller)	kWh / l	Verbrauch	Leitstelle / Zug		LeiDis	eigene Position
78	Energie / Kraftstoff (spezifischer)	kWh / l	Verbrauch	Zug	techn. Datenblatt		Berechnung aus Fahr-Bremshebel, Drehmoment / bei Messreihen
79	Energie / Kraftstoff (wegbezogen)	kWh/100 km l/100km"	Verbrauch	Zug		TEMA-Box / Motorsteuergeräte / Durchflussmesser	
80	Leerlauf	kW / l/s	Verbrauch	Zug			
81	Nebenverbräuche	kWh / l	Verbrauch	Zug			Berechnung Verbrauch zu zurückgelegtem Weg
82	Rekuperation (maximal)	kW	Verbrauch			Feldbussystem (akt.) / TEMA-Box	
83	Rückspeisquote	%	Verbrauch				Berechnung
84	Tankdaten	l	Verbrauch	Zug			
85	Position Messstation	-	Wetter	Extern	Standort		
86	Stündl. Temperaturwerte	°C	Wetter	Extern / Zug		DWD-Informationen / Sensorik am Zug	
87	Wettereinflüsse	-	Wetter	Extern / Zug		DWD-Informationen / Sensorik am Zug	

ID	Kenngröße	Einheit	Kategorie	Datenursprung / Input(-Systeme)			
				Cluster	statisch	dynamisch	aggregiert
88	Ist-Zeit System	hh:mm:ss	Zeit	FAS Leitstelle		GPS Back-office Systeme	Abgleich mit Bahnhofsuhr
89	Zuglänge	m	Zug	Zug	fahrdyn. Datenblätter		
90	Zugmodus	-	Zug	Zug			
91	Zugnummer	-	Zug	Zug / Leitstelle	Eingabe aus Fahrplan / Anmeldung am System / landseitige Datenbank / Back-office-Systeme		